

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iskra Knapp

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Iskra Knapp

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici, prof. dr. sc. Tanji Jurčević Lulić, na savjetima i ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se dr.sc. Jasni Leder Horina na savjetima, pomoći, razumijevanju te puno izdvojenog vremena tokom cijelog semestra.

Zahvaljujem se roditeljima i cijeloj obitelji na velikoj podršci i razumijevanju.

Iskra Knapp



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Iskra Knapp** Mat. br.: 0035198380

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Personalizirani model zuba i okolnog tkiva za utvrđivanje rezultata ortodontske terapije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **A personalized tooth and surrounding tissue model for determining orthodontic therapy results**

Opis zadatka:

Prilikom ortodontske terapije, dolazi do pomicanja zuba u željeni položaj. Položaj ortodontskog aparata na zubu, primijenjeno opterećenje te sam proces pomaka zuba, ovise o iskustvu ortodonta. U radu je potrebno, na temelju CT snimaka pacijenta izraditi personalizirani model zuba s okolnim tkivom prije ortodontske terapije i nakon terapije. Cilj je prikazati položaj zuba prije terapije te nakon terapije i utvrditi pomak krune zuba i vrha korijena zuba te utvrditi promjene u gustoći i modulu elastičnosti okolne kosti. Model se treba sastojati od dva susjedna jednokorijenska zuba (gornji sjekutić i očnjak) s parodontnim ligamentima i kosti koja se sastoji od spužvastog i kortikalnog dijela.

Potrebne parametre modela dogovoriti s mentorom.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zdao:

Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. ZUBI.....	2
2.1. Mliječna i trajna denticija	2
2.2. Teorije o nastanku zuba	3
2.3. Usna šupljina	4
2.3.1. Strane zuba	5
2.4. Podjela zubi	6
2.4.1. Morfološka podjela	6
2.4.1.1. Sjekutići.....	6
2.4.1.2. Očnjaci	7
2.4.1.3. Pretkutnjaci.....	8
2.4.1.4. Kutnjaci	8
2.5. Obilježavanje	9
2.6. Anatomija i struktura zuba	10
2.6.1. Anatomske dijelovi	10
2.6.1.1. Kruna zuba	10
2.6.1.2. Vrat zuba	11
2.6.1.3. Korijen zuba	11
2.6.2. Struktura (građa) zuba.....	11
2.6.2.1. Čaklina	11
2.6.2.2. Dentin	13
2.6.2.3. Pulpa.....	14
2.6.2.4. Cement	16
2.6.2.5. Parodontni ligament	18
2.6.2.6. Alveolna kost.....	18
3. KOŠTANA PREGRADNJA.....	21
4. POREMEĆAJI POLOŽAJA ZUBI.....	22
4.1. <i>Ectopia dentis</i>	22
4.2. <i>Heterotopia dentis</i>	22

4.3.	<i>Transposito dentis</i>	22
4.4.	Inklinacija	23
4.5.	Rotacija.....	23
4.6.	<i>Bodily</i> pomicanje	24
4.7.	Suprapozicija	24
4.8.	Infrapozicija.....	25
5.	ORTODONCIJA	26
5.1.	Mobilna ortodonska naprava	26
5.2.	Fiksna ortodonska naprava	27
5.3.	Pomaci uslijed ortodonske terapije.....	27
5.3.1.	Translacija	28
5.3.2.	Nagib	28
5.3.3.	Rotacija.....	29
5.3.4.	Intruzija	30
5.3.5.	Ekstruzija.....	30
5.4.	Sile uslijed ortodonske terapije	30
5.5.	Faze pomicanja zuba	31
6.	METODOLOGIJA I REZULTATI	32
6.1.	Mimics.....	32
6.1.1.	Računalna tomografija	32
6.2.	Izrada modela	33
6.3.	Očitavanje gustoće alveolne kosti prije i nakon terapije	38
6.3.1.	Rezultati očitavanja gustoće	38
6.3.1.1.	Prije terapije	39
6.3.1.2.	Nakon terapije	41
6.3.2.	Usporedba rezultata očitavanja gustoća	43
6.3.2.1.	Zub 1	43
6.3.2.2.	Zub 2	45
6.4.	Nagib i rotacija	47
6.4.1.	Centar rotacije	48
6.4.2.	Nagib	49
6.4.2.1.	Pomak korijena i krune zuba	52
6.4.3.	Rotacija zuba 2	53
6.5.	Modul elastičnosti.....	54
7.	ZAKLJUČAK	62
	LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1. Mliječna i trajna denticija [2]	2
Slika 2. Razvoj kutnjaka [4]	4
Slika 3. Usna šupljina [2]	4
Slika 4. Zubni lukovi [2]	5
Slika 5. Prikaz orijentacijskih ravnina [2]	5
Slika 6. Morfološka podjela [1]	6
Slika 7. Sjekutići [7]	7
Slika 8. Očnjaci [7]	8
Slika 9. Pretkutnjaci [7]	8
Slika 10. Kutnjaci [7]	9
Slika 11. Morfološke karakteristike trajne denticije [6]	9
Slika 12. FDI Sustav obilježavanja zubi [9]	10
Slika 13. Anatomija zuba [1]	10
Slika 14. Caklina [11]	11
Slika 15. Dentin [11]	13
Slika 16. Pulpo - dentinski kompleks [11]	14
Slika 17. Pulpa [12]	15
Slika 18. Morfološke zone pulpe [12]	15
Slika 19. Cement [13]	16
Slika 20. Acelularni cement (A) i celularni cement (B) [13]	17
Slika 21. Parodontni ligament	18
Slika 22. Alveolna kost [13]	19
Slika 23. Maksila i Mandibula [1]	19
Slika 24. Građa alveolne kosti [13]	20
Slika 25. Koštana pregradnja [14]	21
Slika 26. Ectopia dentis [15]	22
Slika 27. Transposito dentis [15]	23
Slika 28. Rotacija [15]	24
Slika 29. Suprapozicija [15]	24
Slika 30. Infrapozicija [15]	25
Slika 31. Mobilna ortodonska naprava [16]	26
Slika 32. Fiksna ortodonska naprava [16]	27
Slika 33. Centar otpora [18]	28
Slika 34. Translacija [18]	28
Slika 35. Nagib [18]	29
Slika 36. Nekontrolirani i kontrolirani nagib [20]	29
Slika 37. Primjer rotacije [18]	30
Slika 38. (a) Rickett Utility intruzijski luk, (b) Three-Piece intruzijski luk [19]	30
Slika 39. Ekstruzija [19]	30
Slika 40. Faze pomicanja zuba [21]	31
Slika 41. 3D model napravljen iz CT snimke	33
Slika 42. Dijagram HU vrijednosti [21]	33
Slika 43. Učitavanje CT snimki	34
Slika 44. <i>Thresholding</i>	34
Slika 45. 3D model prve maske	35
Slika 46. Izrada modela prije terapije - (a) Maske kosti, zuba i parodontnih ligamenata, (b) Spužvasta i kortikalna kost, (c) Parodontni ligamenti, (d) Modeli zuba 2 i zuba 1	36

Slika 47. Izrada modela nakon terapije - (a) Maske kosti, zuba i parodontnih ligamenata, (b) Spužvasta i kortikalna kost, (c) Parodontni ligamenti, (d) Modeli zuba 2 i zuba 1	37
Slika 48. Prikaz mjernih presjeka.....	38
Slika 49. Položaj karakterističnih točki oko zuba prije terapije.....	39
Slika 50. Položaj karakterističnih točki oko zuba nakon terapije.....	41
Slika 51. Zub 1 - Dijagram gustoće kosti na labijalnoj strani	43
Slika 52. Zub 1 - Dijagram gustoće kosti na lingualnoj strani	44
Slika 53. Zub 1 - Gustoća kosti nakon ortodontske terapije u odnosu na početnu gustoću (izraženo u postocima)	44
Slika 54. Zub 2 - Dijagram gustoće kosti na labijalnoj strani	45
Slika 55. Zub 2 - Dijagram gustoće kosti na lingualnoj strani	46
Slika 56. Zub 2 - Gustoća kosti nakon ortodontske terapije u odnosu na početnu gustoću (izraženo u postocima)	46
Slika 57. Zub 1 u programu 3-Matic	47
Slika 58. Zub 2 u programu 3-Matic	47
Slika 59. Definiranje položaja centra rotacije (Cro) i centra otpora (Cre) [23]	48
Slika 60. Centar rotacije zuba 1	49
Slika 61. Centar rotacije zuba 2	49
Slika 62. Dijagram promjene kuta rotacije i nagiba u periodu trajanja terapije [24].....	50
Slika 63. Nagib zuba 1	50
Slika 64. Nagib zuba 2	51
Slika 65. Dijagram linearne raspodjele nagiba za zub 1 i zub 2.....	51
Slika 66. Pomaci zuba 1	52
Slika 67. Pomaci zuba 2	52
Slika 68. Rotacija zuba 2.....	53
Slika 69. Modeli prije i nakon terapije	54
Slika 70. Zone mandibule (a) i prikaz osi korištenih u testiranju (b) [25]	56
Slika 71. Modul elastičnosti kosti E_x oko zuba 1 labijalno	61
Slika 72. Modul elastičnosti kosti E_z oko zuba 2 lingualno	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijeme nicanja mliječnih i trajnih zubi [1]	3
Tablica 2. <i>Zub 1</i> - Gustoće prije terapije (HU)	39
Tablica 3. <i>Zub 2</i> - Gustoće prije terapije (HU)	40
Tablica 4. <i>Zub 1</i> - Gustoća nakon terapije (HU)	41
Tablica 5. <i>Zub 2</i> - Gustoća nakon terapije (HU)	42
Tablica 6. <i>Zub 1</i> - Promjena gustoće prije i nakon terapije.....	43
Tablica 7. <i>Zub 2</i> - Promjena gustoće prije i nakon terapije.....	45
Tablica 8. Izračunati položaji Cre i Cro pomoću Burstonove pormule i FEM analize [23] ...	48
Tablica 9. <i>Zub 1</i> - Moduli elastičnosti labijalno.....	57
Tablica 10. <i>Zub 1</i> - Moduli elastičnosti lingualno	58
Tablica 11. <i>Zub 2</i> - Moduli elastičnosti labijalno.....	59
Tablica 12. <i>Zub 2</i> - Moduli elastičnosti lingualno	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HU	-	<i>Hounsfield units</i> - vrijednosti gustoće preko nijansi sive boje
E	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti
E_x	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti u smjeru osi x
E_y	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti u smjeru osi y
E_z	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti u smjeru osi z
$\dot{\epsilon}$	$\frac{1}{\text{s}}$	Brzina deformacije
ρ_α	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Prividna gustoća kosti

SAŽETAK

U ovom radu analiziran je personalizirani model zuba s okolnim tkivom prije i nakon ortodontske terapije. U prvom dijelu rada pobliže se upoznaje sami pojam zuba, te stručna terminologija korištena u ostatku rada. Objašnjene su podjele zubi prema periodu nicanja, morfološkim karakteristikama i anatomiji. Spomenuta je i koštana pregradnja koja je uvjet za pomak zuba kod ortodontske terapije. Osim genetskih predispozicija, razni poremećaji uzrokuju nepravilan zagriz. Željeni zagriz omogućuju ortodontske naprave, a postižu ga translacijama, naginjanjima, rotacijama, intruzijama i ekstruzijama zubi. Drugi dio rada posvećen je izradi samog modela zuba sa okolnim tkivom prije i nakon ortodontske terapije. Očitavanjem gustoća te usporedbom njihovih vrijednosti, pretpostavljen je pomak odnosno nagib zuba. Također uslijed promjene gustoće, njezinog pada ili rasta, primijećena je razgradnja, odnosno pregradnja alveolne kosti čime je dokazan proces koštane pregradnje. Kako bi rezultati terapije bili što jasniji, prikazani su u direktnom odnosu te su izmjerene vrijednosti nagiba, pomaka i rotacije zuba. Sama vizualizacija zuba, dovedenih u direktnu vezu, potvrdila je rezultate očitavanja gustoće, a time i donesene pretpostavke. Izračunata je i promjena modula elastičnosti te je prikazano da je ta promjena jednaka promjeni gustoće. Pri analizi korišteni su programi Mimics i 3-Matic.

Ključne riječi: ortodontska terapija, pomak zuba, nagib zuba, rotacija zuba, promjena gustoće

SUMMARY

This paper analyzes a personalized tooth model with the surrounding tissue before and after orthodontic therapy. The first part describes the very concept of tooth, and professional terminology used in the rest of the paper. The division of teeth according to the time of appearance, morphological characteristics and anatomy has been explained. Bone remodeling, which is a precondition for orthodontic therapy, is also mentioned. In addition to genetic predispositions, various disorders cause an irregular bite. Orthodontic devices move teeth to their optimal position by using translation, tipping, rotation, intrusion and extrusion. The second part of the paper deals with the process of making the tooth model with the surrounding tissue before and after orthodontic therapy. Densities have been measured before and after orthodontic therapy, their comparison has shown the pattern of teeth movement. Due to the changes in the alveolar bone density, its decline or growth, bone remodeling process has been proven. In order to make the results of the therapy clearer, they are presented in direct relation and the values of tipping, displacement and rotation have been measured. The visualization of the teeth models, brought to direct connection, confirmed the results of the density measuring and the assumptions that have been made. The change in the elasticity module has been calculated and it is shown that it equals the change in density. Programs Mimics and 3-Matic have been used in the analysis for this paper.

Key words: orthodontic therapy, tooth displacement, tooth tipping, tooth rotation, change in density

1. UVOD

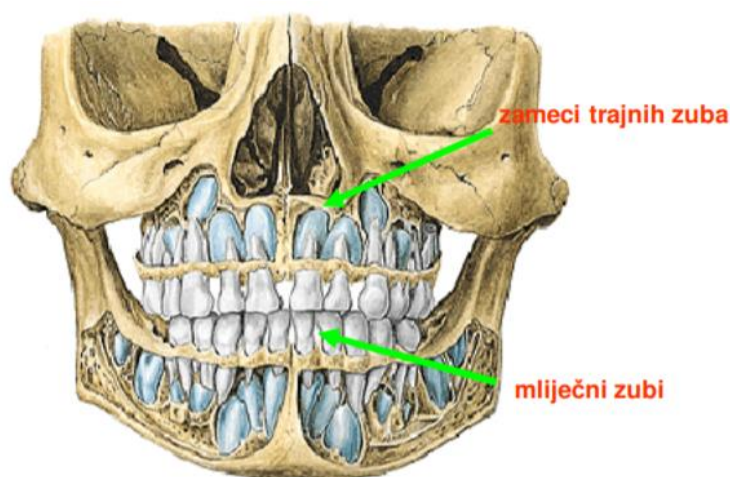
Zubi su prvi pogled u higijenu i zdravlje čovjeka. Osim samih genetskih predispozicija, razni vanjski faktori mogu utjecati na položaj i izgled naših zubi. Kod problema sa zdravljem zubi obraćamo se stomatologu, a za probleme koji se odnose na njihov položaj ortodontu. Nepravilan zagriz ne smije se zanemarivati, iako se može činiti kao samo estetski problem, njegovo prisustvo može uzrokovati puno veće poteškoće. Kod pravilnog zagrizu žvačne sile raspodijeljene su ravnomjerno duž čeljusti, dok kod nepravilnog zagrizu uslijed neravnomjerne raspodjele sila može doći do atrofije, a time i razgradnje kosti, ispadanja zubi i sličnih problema. Osim toga, pri dodiru zuba na nepravilan način može doći do njihovog trošenja i pucanja. Ortodonska terapija omogućuje da se u relativno kratkom vremenu postigne željeni zagriz i samim time bolja kvalitetu života. U radu je potrebno, na temelju CT snimaka pacijenta izraditi personalizirani model zuba s okolnim tkivom prije ortodonske terapije i nakon terapije. Cilj je prikazati položaj zuba prije terapije te nakon terapije i utvrditi pomak krune zuba i vrha korijena zuba te utvrditi promjene u gustoći i modulu elastičnosti kosti.

2. ZUBI

Zubi (lat. *dentes*), su čvrsti mineralizirani žvačni organi koji se nalaze u ustima većine kralježnjaka (nemaju ih ptice, neke ribe i neki sisavci) [1]. Funkcija im je grizenje i žvakanje hrane, a kod životinja još i hvatanje i držanje plijena, a katkad i obrana od napada. Oblik zuba prilagođen je funkciji koju obavljaju u procesu obradbe hrane te razlikujemo: sjekutiće, očnjake, pretkutnjake i kutnjake. Osim toga zubi imaju estetsku i fonetsku ulogu.

2.1. Mliječna i trajna denticija

Neke životinje mijenjaju zube tijekom cijeloga života, a neke nikada. Kod čovjeka, zubi se javljaju u dvije generacije, kao mliječni i trajni zubi [1]. Razvoj zuba ili odontogeneza niz je vrlo složenih biokemijskih procesa, koje kontroliraju mnogobrojni geni. Započinje u 6. tjednu embrionalnoga razvoja, kada se u području zubnih gredica formira 20 zubnih pupoljaka, iz kojih će se razviti po jedan mliječni zub. Zametci trajnih zuba počinju se razvijati u 5. mjesecu embrionalnoga razvoja, formiranjem prvih pupoljaka trajnih zuba. Poremećaji normalnoga razvoja zuba uzrokuju abnormalnosti broja, veličine, oblika i strukture zuba. Nicanje ili erupcija mliječnih zuba odvija se od 6. do 30. mjeseca života, a završava obično do 3. godine. Od 6. godine počinju nicali trajni zubi, koji prevladavaju u usnoj šupljini od 12. godine; treći kutnjak (umnjak) izbija znatno kasnije od ostalih zuba (obično nakon puberteta) [Tablica 1]. Od 6. do 12. godine zastupljeni su zubi obje generacije (mješovita denticija). Slika 1 prikazuje mliječnu denticiju te zametke trajne denticije.



Slika 1. Mliječna i trajna denticija [2]

Trajnih zuba ima ukupno 32, po 16 u svakoj čeljusti. Na razvoj i brzinu nicanja zuba mogu djelovati hormoni štitnjače i hormon rasta. Osim toga, na pohranu soli u zubima u ranom stadiju njihovog razvoja djeluju količina kalcija i fosfata u hrani, vitamin D, paratireoidni

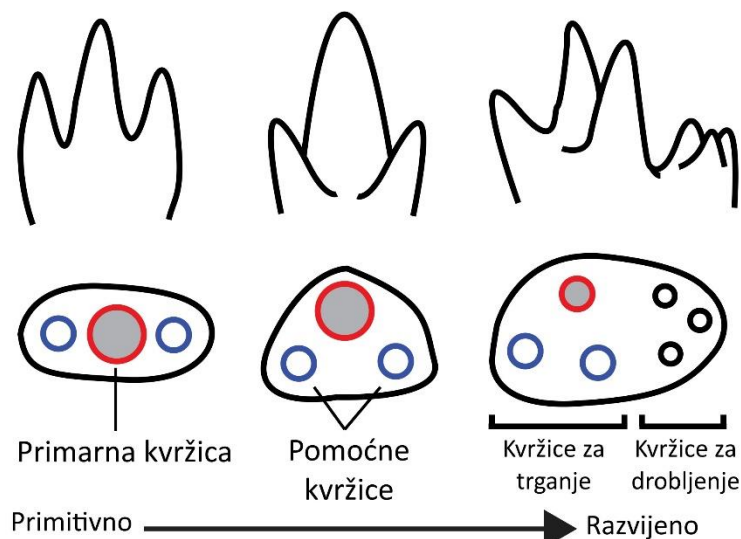
hormon i slično. Kada su svi navedeni faktori u normali, strukture zuba se pravilno razvijaju, a u suprotnom razvoj i struktura zubnih organa mogu biti ozbiljno poremećeni [3].

Tablica 1. Vrijeme nicanja mliječnih i trajnih zubi [1]

	MLIJEČNI ZUBI				TRAJNI ZUBI			
	Donji		Gornji		Donji		Gornji	
	Vrijeme (mj.)	Redoslijed	Vrijeme (mj.)	Redoslijed	Vrijeme (god.)	Redoslijed	Vrijeme (god.)	Redoslijed
Središnji sjekutić	6	1	7,5	1	6 - 7	2	7 - 8	2
Lateralni sjekutić	7	2	9	2	7 - 8	3	8 - 9	3
Očnjak	16	4	19	4	9 - 10	4	11 - 12	6
Prvi pretkutnjak	-	-	-	-	10 - 11	5	10 - 11	4
Drugi pretkutnjak	-	-	-	-	11 - 12	6	11 - 12	5
Prvi kutnjak	12	3	14	3	6 - 7	1	6 - 7	1
Drugi kutnjak	20	5	24	5	11 - 13	7	12 - 13	7
Treći kutnjak	-	-	-	-	17+	8	17+	8

2.2. Teorije o nastanku zuba

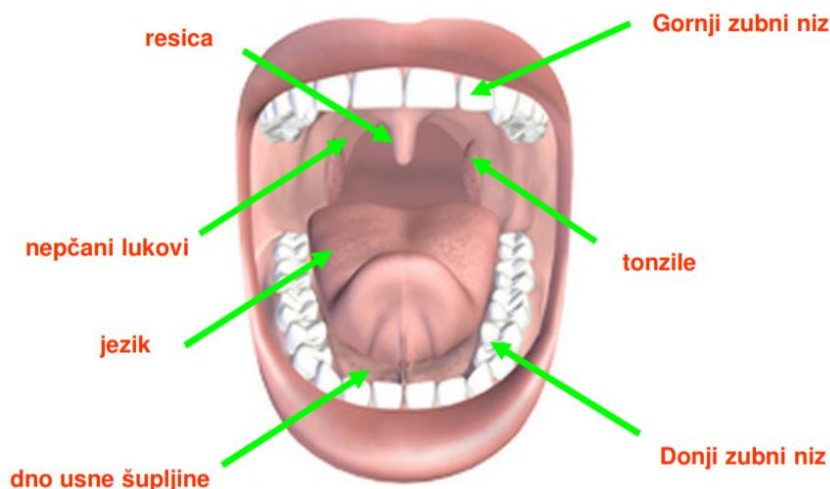
Postoji nekoliko teorija koje objašnjavaju nastanak zuba, a sve se zasnivaju na analizama fosilnih ostataka. Nijedna od njih nije u potpunosti potvrđena [3]. Trituberkularna teorija ili teorija diferencijacije kaže da je čovječje zubalo nastalo od jednokvržičnih zuba reptila. Ovu teoriju je objavio Osborne 1888. godine. On smatra da su se na postojećoj kvržici prvo pojavile dvije oštre elevacije, od kojih su daljom evolucijom nastale još dvije kvržice. U periodu Jure pojavile su se i dodatne kvržice, te su tako formirane okluzalne površine današnjih kutnjaka [Slika 2]. Konkrescentna teorija smatra da su današnji zubi sisavaca nastali spajanjem pojedinačnih zuba reptila, i da broj kvržica odgovara broju spojenih primarnih zuba. Koncentracijska ili dimer teorija, koju je predložio Bolk 1916. godine, kaže da su složeni zubi sisavaca nastali nepotpunim cijepanjem jednostavne dentalne osnove reptila.



Slika 2. Razvoj kutnjaka [4]

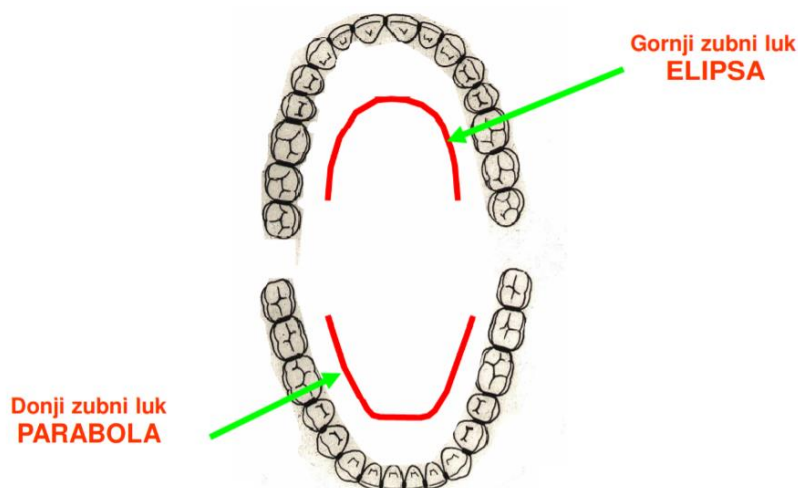
2.3. Usna šupljina

Usna šupljina [Slika 3] proteže se od usnica i obraza do nepčanih lukova. Nekoliko je funkcija usne šupljine: prehrana, žvakanje, gutanje te disanje i govor. Nizovi zuba, uloženi u alveolarne nastavke maksile i mandibule, a obloženi gingivom, čine zubne lukove. Gornji zubni luk ima oblik elipse, a donji oblik parabole [Slika 4]. Gornji zubni niz dio je lubanje i time nepokretan, dok je donji niz dio pomične donje čeljusti. Zubi se nalaze u stabilnom položaju u neutralnom prostoru koji je osiguran ravnotežom sila usnica, obraza i jezika.



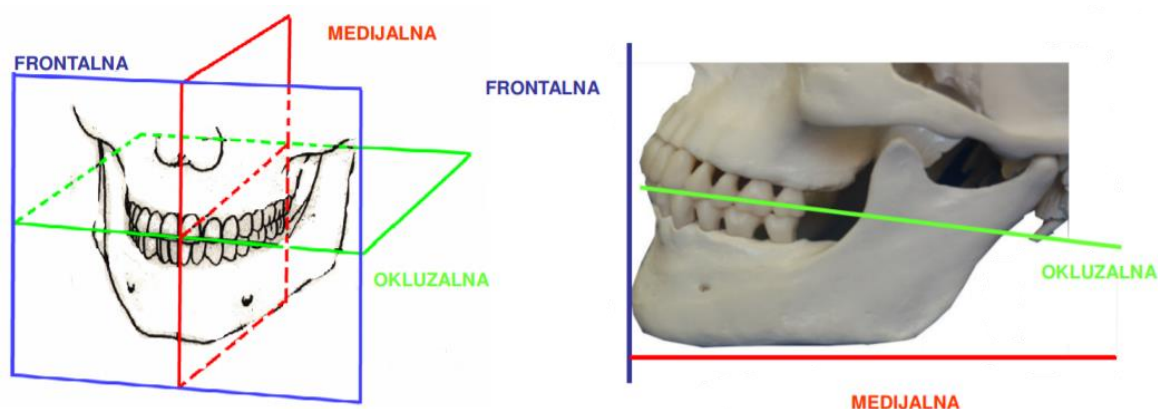
Slika 3. Usna šupljina [2]

Položaj zubi u čeljustima i njihov oblik određen je genetikom, odnosima između obraza i jezika, ravnotežom sila mišića obraza i jezika, temporomandibularnim zglobovima (zglobovi koji spajaju čeljust s ostatkom lubanje) i kostima čeljusti, silama žvakanja te različitim silama koje djeluju tijekom rasta i razvoja.



Slika 4. Zubni lukovi [2]

Sile mišića obraza i jezika omogućavaju pravilno pozicioniranje u vestibulooralnom smjeru (prostor između zuba i usne u smjeru prema ustima) [5]. Orijentacijske ravnine su prikazane na Slici 5. Različiti poremećaji u djelovanju tih sila utječu i na položaj zubi u čeljusti te njihove međusobne odnose. Sile žvakanja, gutanja i govora također određuju pozicioniranje zuba. Svi zubi imaju tendenciju mezijalizacije (naginjanja zuba mezijalno) koju u normalnim uvjetima sprečavaju kontaktne točke, odnosno plohe. Ta tendencija naročito je izražena pri gubitku kontaktne točke gdje brzo dolazi do pomicanja zuba mezijalno ili naginjanja zuba. Vertikalnu poziciju zubi određuje njihov međusobni kontakt. Nedostatak ili prisutnost tog kontakta također pomaže ili omogućuje pomicanje zubi u ostalim pravcima. Nije neuobičajeno da nakon gubitka antagonističkog kontakta dolazi do izrastanja zuba što ubrzo narušava harmoniju cjelokupnog žvačnog sustava.



Slika 5. Prikaz orijentacijskih ravnina [2]

2.3.1. Strane zuba

Pri opisivanju često se koriste različiti nazivi koji opisuju strane zuba. Prednji zubi imaju četiri strane i jedan greben, a bočni zubi imaju pet površina (uključujući i okluzalnu). Vanjska

strana se naziva vestibularna, jer je okrenuta prema ulazu (vestibulumu) usne šupljine. Njeni sinonimi su labijalna strana za prednje zube, jer je okrenuta prema usnama, i bukalna strana za bočne zube, jer je okrenuta prema obrazima. Unutarnja strana zuba se jednim imenom naziva oralna ili palatalna, odnosno lingualna, jer je okrenuta prema usnoj šupljini. Strana svakog zuba okrenuta prema medijalnoj liniji (koja dijeli lice na dvije simetrične polovine) naziva se mezijalna strana. Nasuprot mezijalne nalazi se distalna strana, a zajednički naziv im je proksimalne strane. Strana zuba okrenuta prema antagonistima (zubi jedne čeljusti koji se poklapaju sa zubima druge čeljusti) naziva se grizna ili okluzalna strana. Na korijenu se još razlikuje njegov završni dio, koji se naziva vrh korijena (apeks) na kome se nalazi i otvor za ulazak krvnih i limfnih žila, živaca i drugih struktura u unutrašnjost zubne šupljine.

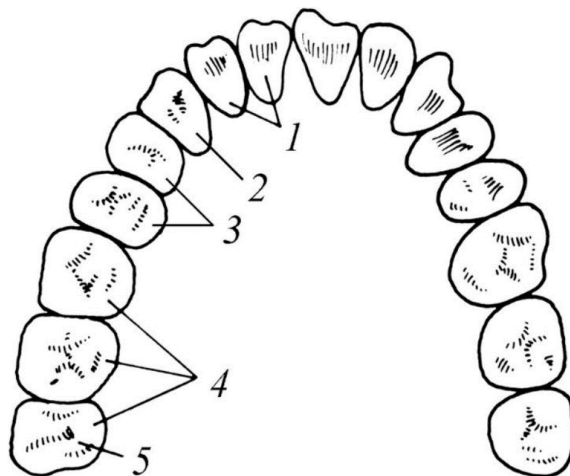
2.4. Podjela zubi

Zubi se mogu podijeliti po:

- periodu nicanja (mliječna i trajna denticija),
- morfološkom obliku i
- lokaciji u dentalnom luku (gornje i donje, desne i lijeve, prednje i bočne).

2.4.1. Morfološka podjela

S obzirom na morfološke karakteristike razlikujemo sjekutiće (1), očnjake (2), pretkutnjake (3) i kutnjake (4, 5 -treći kutnjak ili umnjak) [Slika 6].



Slika 6. Morfološka podjela [1]

2.4.1.1. Sjekutići

Sjekutići su postavljeni centralno unutar zubnih nizova [6]. U čeljusti ukupno ima osam sjekutića po dva sa svake strane (desno i lijevo) u gornjoj i donjoj čeljusti. Sjekutić koji se nalazi neposredno uz medijalnu liniju je centralni (prvi), a distalno od njega nalazi se lateralni (drugi). Sjekutići u istom zubnom nizu međusobno su sličniji u odnosu na sjekutiće iz suprotnog niza.

Po veličini dominira gornji centralni sjekutić, a veličina opada do donjeg centralnog sjekutića koji je ujedno i najmanji zub stalne denticije. Krune gornjih centralnih sjekutića, u usporedbi s donjim, obično su veće u svim dimenzijama, naročito u meziodistalnom pravcu. Kruna gornjeg lateralnog sjekutića obično je slična po obliku kruni gornjeg centralnog sjekutića, ali je u cijelosti manja. Donji sjekutići su najjednostavniji i najmanji zubi u stalnoj denticiji, veoma stabilnog oblika sličnog dlijetu. Svih osam sjekutića ima po jedan korijen [7]. Njihova uloga je da kod grizenja trgaju hranu, usitnjavaju je, odnosno sjeckaju, po čemu su i dobili ime [8]. Uz svoju primarnu funkciju, naspram svih ostalih zuba, sjekutići su najvažniji kod govora i izgovaranja riječi te u konačnici, kada uzmemo u obzir njihovu poziciju, očita je i estetska važnost [Slika 7].



Slika 7. Sjekutići [7]

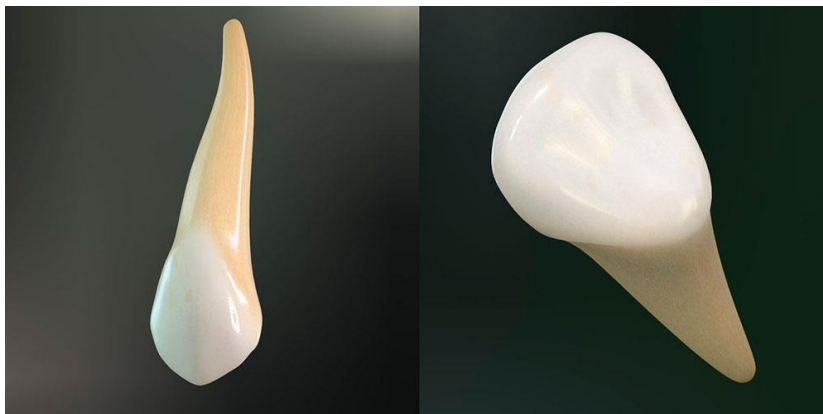
2.4.1.2. Očnjaci

Ima ukupno četiri očnjaka, tj. po dva u svakoj čeljusti, nalaze se bočno od sjekutića, a ispred pretkutnjaka. Očnjak je treći zub od medijalne linije u svakom kvadrantu [6]. Opće morfološke karakteristike gornjeg i donjeg očnjaka su slične.

Sljedeće osobine karakteriziraju sve očnjake [Slika 8]:

- prisustvo jedne konične kvržice (solitarna kvržica)
- s vestibularnog aspekta kruna pokazuje oblik peterokuta, slično konturi bukalne površine susjednog prvog pretkutnjaka

Lingualna jama je slične prostorne orijentacije kao i kod susjednih sjekutića, ali je lingualnim kvržičnim grebenom podijeljena na mezio i distolingualni dio. Očnjak ima širok te najduži korijen od svih zuba u pripadajućem zubnom nizu, te su zbog toga očnjaci najduži zubi u vilici. Ovaj zub najstabilniji je zub u zubnim nizovima. Boja im je malo tamnija, žuća od sjekutića. S obzirom da su očnjaci najistureniji zubi u ustima, samim time utječu i na fizionomiju našeg lica. Uloga očnjaka je trgati i usitnjavati žilaviju hranu kao što je meso [7].



Slika 8. Očnjaci [7]

2.4.1.3. Pretkutnjaci

Pretkutnjaci su smješteni nakon očnjaka prema kraju čeljusti. Imamo osam pretkutnjaka, po dva sa svake strane na gornjoj i donjoj čeljusti [7]. Pretkutnjaci su četvrti i peti zubi od sagitalne medijalne linije, a označeni su kao prvi i drugi pretkutnjak [6]. Gornji pretkutnjaci međusobno su slični, s buknog aspekta kruna ima oblik peterokuta, slično očnjaku [Slika 9]. Donji pretkutnjaci međusobno su manje slični od gornjih pretkutnjaka. To su jednokorijenski zubi, pri čemu je korijen donjeg drugog pretkutnjaka nešto masivniji i duži u usporedbi s prvim donjim pretkutnjakom. Pretkutnjaci postoje samo kao trajni zubi i nema ih u mliječnoj fazi, kada izrastu zamjenjuju mliječne kutnjake. U žvakanju oni predstavljaju posrednika, sponu koja je otrgnuti komad hrane donekle usitnila kako bi ju kutnjaci samljeli [8].

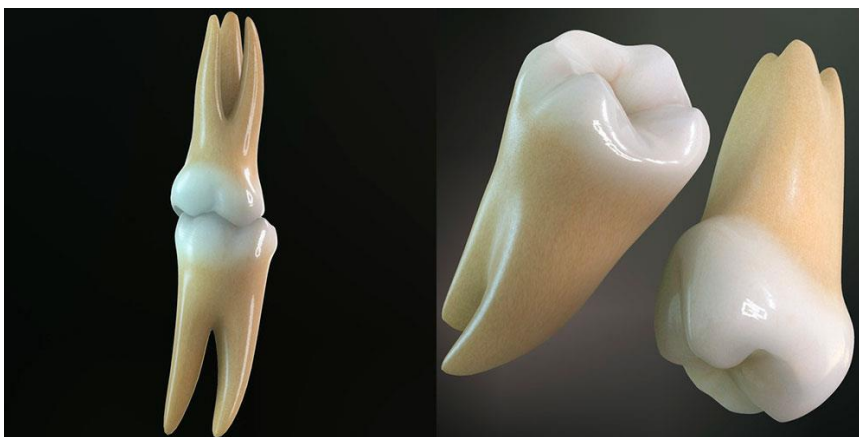


Slika 9. Pretkutnjaci [7]

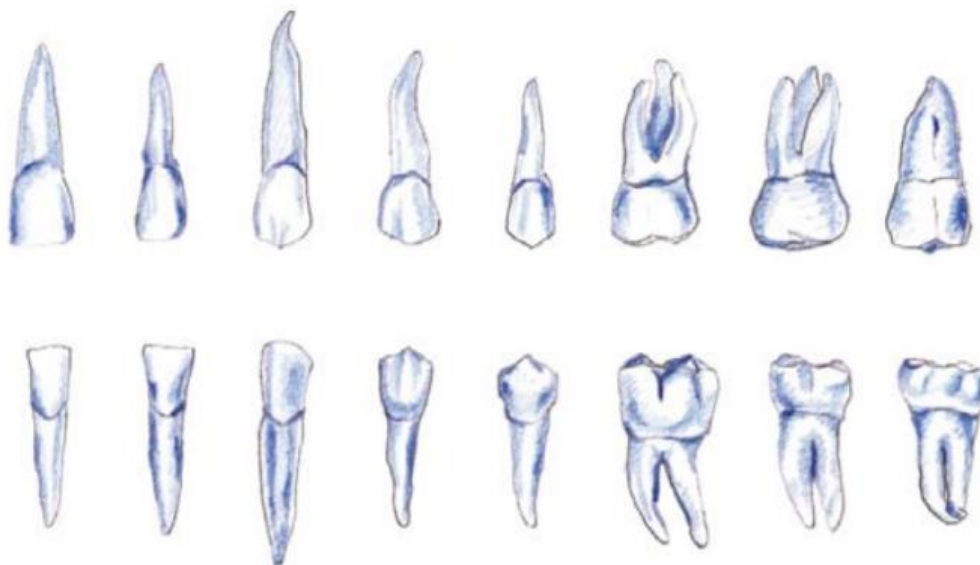
2.4.1.4. Kutnjaci

Stalni kutnjaci su najveće zubne jedinice u zubnim nizovima [Slika 10]. Obično je prisutno dvanaest kutnjaka, po tri u svakom kvadrantu, smješteni na kraju zubnog mesa. Kod mliječnih zubi imamo samo osam kutnjaka [7]. Kutnjaci se označavaju kao prvi, drugi i treći stalni kutnjak i to od mezialno prema distalno, u svakom kvadrantu, te obično imaju tri korijena [6]. Slično gornjim antagonistima, donji stalni kutnjaci pokazuju smanjenje u veličini

udaljavanjem od medijalne linije [Slika 11]. Prvi nikne oko 6. godine i otprilike svakih 6 godina novi red se popuni. Posljednji u nizu od prethodno spomenuta tri zuba, poznatiji kao umnjak, najčešće se pojavljuje nakon 18. godine starosti [8]. Smatra se kako smo u toj dobi dovoljno zreli i iskusni pa i samim time dobiva i ime umnjak. Nije rijedak slučaj da umnjak uopće ne izraste. Okarakteriziran je kao zub koji je sklon kvarenju i koji ima tendenciju da svojim nicanjem pomiče druge zube. Umnjak se najčešće i vadi kako bismo sačuvali druge zube zdravima i lijepima. Kutnjaci, iako slabo vidljivi, oblikuju našu čeljust i utječu na konačni izgled našeg lica. Funkcija im je drobljenje i usitnjavanje hrane prije gutanja [7].



Slika 10. Kutnjaci [7]

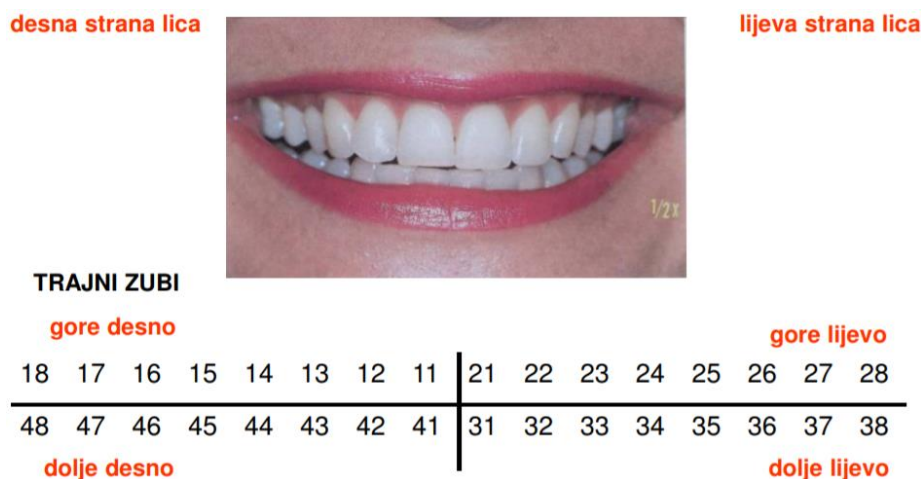


Slika 11. Morfološke karakteristike trajne denticije [6]

2.5. Obilježavanje

Zubi se za kliničku praksu obilježavaju uporabom brojeva, slova ili koordinatnoga križa. Nekoliko je sustava obilježavanja zuba [9]. Spominju se Haderupov sustav, Palmer-Zigmondyjev sustav, Univerzalni sustav i FDI-sustav. Najčešće se koristi FDI- sustav (dualni

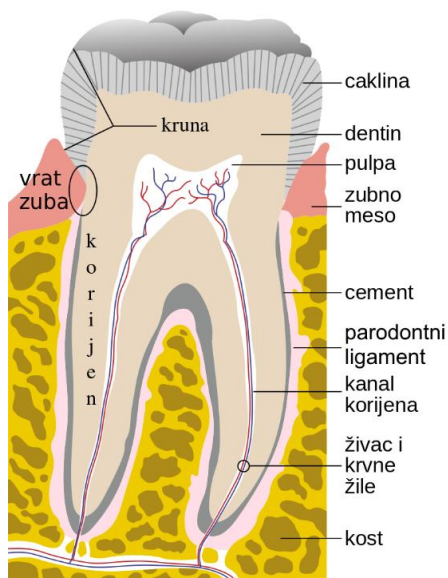
ili dvobrojni sustav). Predložila ga je FDI (Federation Dentaire Internationale) u Bukureštu 1970. godine. U tom sustavu svaki se zub označava s dvije brojke: prva označava kvadrant, a druga broj zuba [Slika 12]. Kvadranti u trajnoj denticiji su 1, 2, 3, 4. Kvadranti u mliječnoj denticiji su 5, 6, 7, 8. Izgovara se svaka znamenka oznake pojedinačno, npr. zub s oznakom 11 je: “zub jedan jedan”, a ne “jedanaest”; oznaka 11 se odnosi na trajni gornji desni prvi sjekutić.



Slika 12. FDI Sustav obilježavanja zubi [9]

2.6. Anatomija i struktura zuba

Slika 13 prikazuje tri osnovna dijela zuba: kruna, vrat i korijen [1].



Slika 13. Anatomija zuba [1]

2.6.1. Anatomske dijelovi

2.6.1.1. Kruna zuba

Kruna zuba (lat. *corona dentis*) se označava s dva termina: anatomska i klinička kruna. Anatomska kruna je dio zuba prekriven caklinom [1]. Ona se kod intaktnog zubnog niza ne vidi

cijela, jer joj je vratni dio prekriven desnama. Klinička kruna je vidljivi dio zuba i može, ali ne mora, odgovarati anatomske kruni. Ona se obično mijenja tijekom života uslijed resorpcije okolnog koštanog tkiva, povlačenja gingive i slično.

2.6.1.2. Vrat zuba

Vrat zuba (lat. *collum s. cervix dentis*) je suženje na granici cakline i cementa, u obliku plitkog žlijeba (cervikalna linija ili caklinsko-cementni spoj) i u fiziološkim uvjetima je prekriven sluznicom usta [1]. Između zuba i sluznice nalazi se uzak prostor dubine do 1,5mm koji se naziva fiziološki džep.

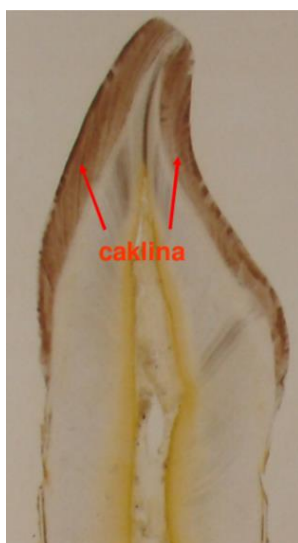
2.6.1.3. Korijen zuba

Korijen zuba (lat. *radix dentis*) također je označen sa dva termina. Anatomske korijen je dio zuba prekriven cementom i usađen je u zubnu jamicu (alveolu). Klinički korijen je onaj dio zuba koji se ne vidi i može, ali ne mora, odgovarati anatomske korijenu. Broj i veličina korjenova varira od zuba do zuba.

2.6.2. Struktura (građa) zuba

2.6.2.1. Caklina

Caklina je najtvrdije tkivo u ljudskom organizmu, s preko 95 % anorganskog sadržaja. Ona štiti strukturu zuba od jakih žvačnih sila, te daje vanjski oblik kruni zuba [Slika 14] [10]. Caklina je tvrdo zubno tkivo koje potječe od embrionalnog oralnog epitela (ektoderm). Ameloblasti – stanice koje stvaraju caklinu, nestaju nakon što zub iznikne, pa se caklina ne može regenerirati.



Slika 14. Caklina [11]

Fizikalna svojstva cakline:

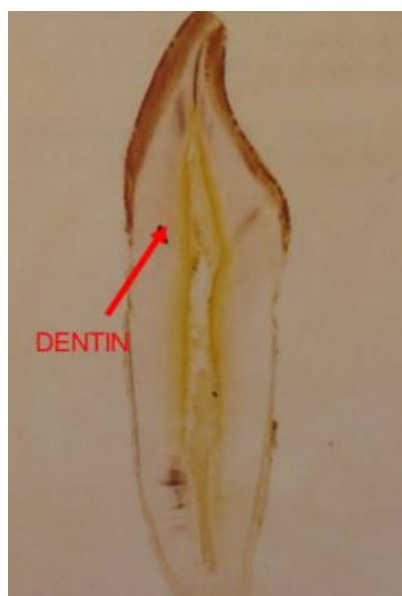
- boja
 - caklina je poluprozirna
 - boja joj je siva ili plavkasto-bijela, dok na žvačnim bridovima sjekutića ta boja može biti promijenjena u žućkasto-bijelu zbog podležećeg dentina (boja cakline ovisi o njenoj debljini)
 - kod mliječnih zubi je caklina mutnija, bjeljih nijansi
- debljina
 - debljina cakline varira od maksimalnih 2,5 mm na griznim ploham, do nekoliko desetinki milimetra na cervikalnom rubu
 - debljina bočnih stjenki se kreće oko 1,3 mm
- tvrdoća
 - tvrdoća cakline je velika što omogućava otpornost na žvačne sile, te zaštitu dentina
 - caklina je najtvrdje tkivo u tijelu
 - površni slojevi su tvrdi od dubljih
- modul elastičnosti
 - caklina ima visok modul elastičnosti, rigidna je i krhka, te niske čvrstoće
 - zbog toga caklina mora uvijek biti poduprta dentinom, jer se u protivnom lako lomi (npr. kod karijesa ili nepravilne preparacije kaviteta)
- permeabilnost (propusnost)
 - permeabilitet cakline je ograničen
 - Sustav pora različitih dimenzija omogućuje protok vodenim otopinama
 - Tekućine, bakterije i njihovi produkti mogu prodrijeti kroz caklinu kroz razne mikroskopske pukotine između caklinskih prizama i kristala
- gustoća
 - gustoća cakline je približno 2,8 – 3,0 g/ml.

Kemijska svojstva cakline

- potpuno zrela caklina ima visok stupanj mineraliziranosti i s obzirom na masene udjele sastoji se od
 - 96% mineralne tvari (anorganski dio)
 - 1% organske tvari
 - 3% voda
- sastav cakline s obzirom na volumne udjele
 - 89% mineralne tvari (anorganski dio)
 - 2% organske tvari
 - 9% voda.

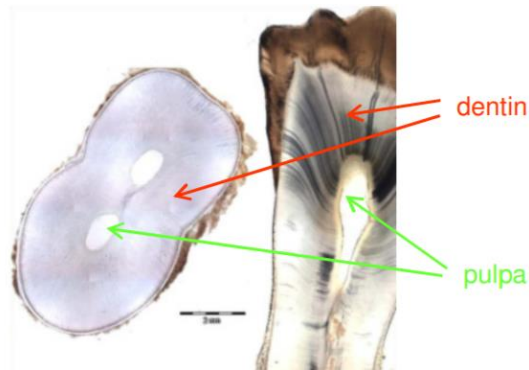
2.6.2.2. Dentin

Dentin tvori najveći dio zuba [11]. U kruni ga pokriva caklina s kojom je u kontaktu na caklinsko-dentinskom spojištu (CDS) kao što je prikazano na Slici 15. U korijenskom dijelu zuba prekriva ga cement. Dentin opkoljuje pulpnu šupljinu. Nekoliko je vrsta dentina: predentin, primarni dentin, sekundarni i tercijarni dentin.



Slika 15. Dentin [11]

Pulpa i dentin potječu iz zubne papile. Zbog tijesne veze u njihovom podrijetlu često se upotrebljava izraz pulpo-dentinski kompleks [Slika 16].



Slika 16. Pulpno - dentinski kompleks [11]

Fizikalna svojstva dentina:

- boja
 - dentin je blijedo - žute boje
- tvrdoća
 - tvrdi je od kosti i cementa, a mekši od cakline
- elastičnost i propusnost
 - dentin je vrlo elastičan
 - nije krhak, prožet je sustavom cjevčica i propusniji je od cakline
- gustoća:
 - gustoća dentina je približno 2,1 g/ml.

Kemijska svojstva dentina:

- sastav dentina s obzirom na masene udjele
 - 70% anorganske tvari
 - 20% organske
 - 10% vode
- sastav dentina s obzirom na volumne udjele
 - 47% anorganske tvari
 - 32% organske
 - 21% vode.

2.6.2.3. Pulpa

Zubna pulpa rahlo je vezivno tkivo porijeklom iz zubne papile, koje zauzima središnji položaj unutar zuba [12]. Zubna pulpa je tkivo koje je odgovorno za produkciju dentina. Smještena je u pulpnoj komori i korijenskom kanalu [Slika 17]. Pulpa je u kontinuitetu s

vezivnim tkivom parodontne sveze preko vrška (apeksa) svakoga korijena i eventualno bočnim ili dodatnim (akcesornim) korijenskim kanalima. Starenjem, trajnim stvaranjem dentina sužuju se pulpni kavitet i vršci korijena.



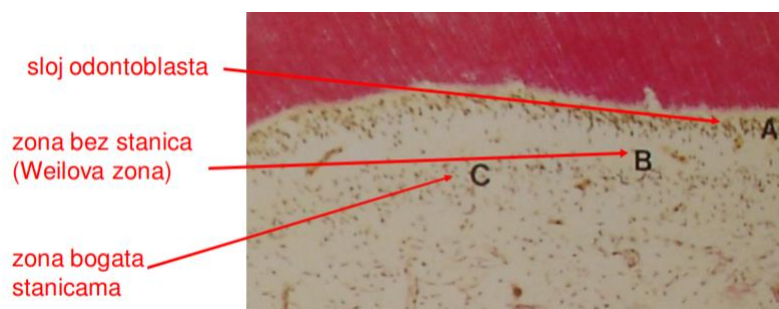
Slika 17. Pulpna [12]

Funkcija zubne pulpe ne završava razvojem zuba i njegovim nicanjem, već se nastavlja tijekom života produkcijom sekundarnog i tercijarnog dentina, što predstavlja njezinu zaštitnu funkciju.

Osim zaštite, zubna pulpa ima sljedeće funkcije:

- hranidbenu – opskrba krvlju i hranjivim tvarima
- senzoričku – registracija temperature, mehaničkih i kemijskih čimbenika koji djeluju na dentin i pulpu
- formativnu – kontinuirano održavanje i stvaranje dentina
- obrambenu funkciju – pokretanje upalnog odgovora

Postoje četiri zone pulpe [Slika 18]; gledajući od izvana prema unutra, to su: odontoblastični sloj, sloj siromašan stanicama (zona bez stanica ili Weilova zona), sloj bogat stanicama i srž pulpe.



Slika 18. Morfološke zone pulpe [12]

2.6.2.4. Cement

Cement je tanki sloj mineraliziranoga tkiva koje prekriva vanjsku površinu korijena zuba [Slika 19]. Cement se pruža od cervikalnog ruba cakline do vrha korijena [13]. U apikalnom dijelu, kod zuba sa završenim rastom korijena, cement se dijelom pruža i preko apikalnog otvora, izgrađujući unutrašnji zid kanala. Debljina cementa razlikuje se u odnosu na starost i dio korijena. Cement je obično deblji na apikalnome dijelu korijena i u interradikularnom području višekorijenskih zubi. Debljina cementa u vršku korijena može premašiti 600 μm , a cervikalno može biti samo 10 μm .



Slika 19. Cement [13]

Funkcije cementa su sljedeće:

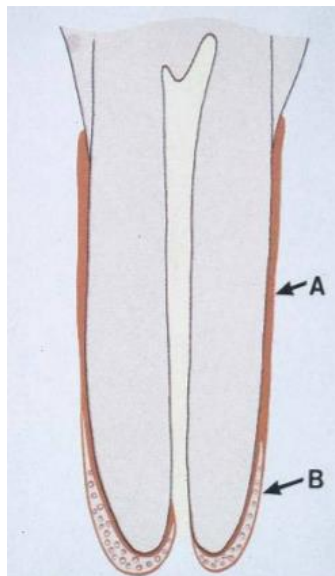
- vezanje kolagenih vlakana parodontnog ligamenta za površinu dentina i omogućavanje funkcioniranja potpornog aparata zuba
- održavanje odgovarajuće širine parodonta i dužine korijena koje su potrebne za savladavanje fizioloških i funkcionalnih opterećenja
- cement je reparaciono tkivo kojim se nadoknađuju oštećenja u području korijena

Cement je histološki dosta sličan kosti, od koje se ipak bitno razlikuje jer ne posjeduje vlastitu vaskularizaciju. Osim histološki cement je sličan koštanom tkivu i po svojim fizikalnim svojstvima.

Fizikalna svojstva cementa:

- tvrdoća
- njegova tvrdoća je manja od tvrdoće dentina

- boja
 - osnova boja je svijetlo žućkasta, ali zbog svoje transparencije acelularno-fibrilarni cement poprima boju dentina i žute je boje kao i kost
- propusnost
 - propusnost cementa se mijenja sa starošću, celularni cement je propusniji od acelularnog [Slika 20]
 - smanjenje propusnosti je posljedica pojačane mineralizacije praćene starenjem.



Slika 20. Acelularni cement (A) i celularni cement (B) [13]

Slika 20 prikazuje dvije vrste cementa. Celularni cement sadrži stanice (cementocite); pretežno je smješten u vršku korijena i prekriva acelularni cement. Acelularni cement ne sadrži stanice i prekriva dentin.

Kemijska svojstva cementa:

- ekstracelularni matriks cementa je građen od organske i anorganske tvari.
- u masenim omjerima:
 - na organski dio otpada 27%
 - na neorganski 61%
 - dok preostalih 12% čini voda
- u volumnim omjerima:
 - 30% otpada na organski dio
 - 45% na neorganski dio
 - 25% na vodu.

Organski dio cementa čine kolagena vlakna i osnovna tvar [13]. Kolagena vlakna pripadaju kolagenu tipa I koji je po svojoj strukturi sličan kolagenu u koštanom tkivu. Kemijska obilježja osnovne tvari cementa su još uvijek nepoznata. Koncentracije kalcija, fosfora i magnezija su u cementu visoke i konstantne. Kalcij-fosfat uglavnom tvori kristale hidroksiapatita, s tim da postoji i u amorfnom obliku.

2.6.2.5. Parodontni ligament

Parodontni ligament (parodontna sveza) je gusto vezivno tkivo koje kao dio parodonta osigurava vezanje zuba putem njegovog cementa na okolnu alveolnu kost [13]. Parodontni ligament je na rendgenskim snimkama vidljiv kao tamno sivo, radiolucetno područje, tzv. parodontni prostor širok između 0,4 mm i 1,5 mm koji se proteže između alveolne kosti i cementa [Slika 21]. Razvija se iz zubnoga folikula. Iznad alveolnog ruba sveza je u kontinuitetu s vezivnim tkivom gingive, a u području apeksa zuba s pulpnim tkivom preko apikalnog foramena.



Slika 21. Parodontni ligament

Parodontni ligament se sastoji od stanica, međustanične tvari i vlakana. Opskrbljen je krvnim i limfnim žilama, živcima, koji prolaze kroz apikalni foramen i ulaze u pulpu. Njegove funkcije su da zadržava gingivu u pravilnom položaju spram zuba, amortizira i prenosi okluzalne sile sa zuba na alveolnu kost, stanice parodontnog ligamenta sudjeluju u stvaranju i resorpciji tvrdih tkiva parodonta, krvne žile parodontnog ligamenta osiguravaju hranu stanicama parodontnog ligamenta, te okolnim stanicama cementa i alveolne kosti. Kosti i živci parodontnog ligamenta su sastavni dio proprioceptivnog mehanizma zaduženog za prijenos osjeta boli, pritiska, dodira i sl.

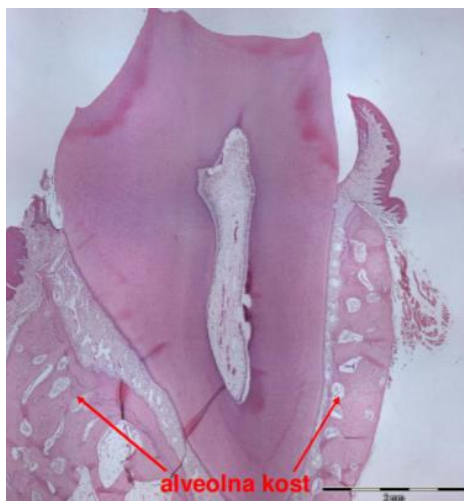
2.6.2.6. Alveolna kost

Alveolna kost se može definirati kao koštano tkivo koje ima zadatak okružiti i učvrstiti zube [Slika 22]. Ona izgrađuje alveolni nastavak koji predstavlja kontinuiranu cjelinu s

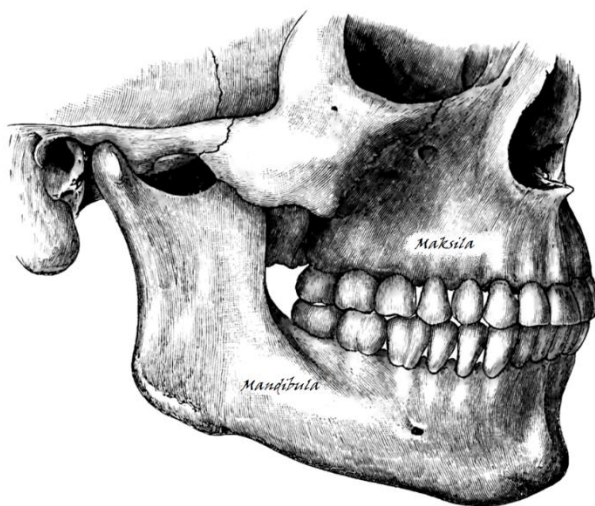
bazalnim kostima maksile i mandibule [Slika 23]. Alveolna kost se razvija tijekom nicanja zuba i resorbira se po njihovom gubitku.

Ima dvije osnovne uloge:

- potpornu – sudjeluje u povezivanju parodontnih vlakana
- prijenosnu – preko nje se sile oslobođene tijekom žvakanja, gutanja, govora i sl. razlažu, prenose i amortiziraju.



Slika 22. Alveolna kost [13]



Slika 23. Maksila i Mandibula [1]

Kemijska svojstva alveolne kosti:

- u masenim udjelima, alveolna kost je izgrađena od
 - 45% neorganskog dijela
 - 35% organskog dijela
 - preostalih 25% čini voda

- u volumenskim udjelima
 - anorganski dio čini 23%
 - organski 37%
 - te voda 40%.

Preko 90% organskog dijela otpada na kolagen. Preostali dio organskog dijela tvore citrati (1%), glikoproteini (6,5 – 10 %), proteoglikani (0,8 %) i lipidi (0,4 %). Oko 60% neorganskog dijela koštanog tkiva je organizirano u obliku kristala hidroksiapatita, dok je preostalih 40% najvjerojatnije amorfni kalcij-fosfat.

S obzirom na funkciju, alveolna kost se može podijeliti na dio kosti u koji se pripajaju vlakna parodontnog ligamenta i potporni dio kosti kojeg čine vanjska kompakta i spongioza [Slika 24].



Slika 24. Građa alveolne kosti [13]

3. KOŠTANA PREGRADNJA

Koštana pregradnja je dinamični proces kosti u kojem dolazi do razgradnje kosti i rasta nove kosti [14]. Ovim procesima se osigurava kontinuirana zamjena starog koštanog tkiva novim. Bilo da se radi o mirovanju tijela, mikro frakturama kosti prilikom fizičke aktivnosti, ili rasta kostiju, proces pregradnje je općeprisutan. Koštane stanice osteoklasti razgrađuju staro ili nepotrebno koštano tkivo resorpcijom, te se sve oslobođene tvari koriste za izgradnju novog koštanog tkiva.

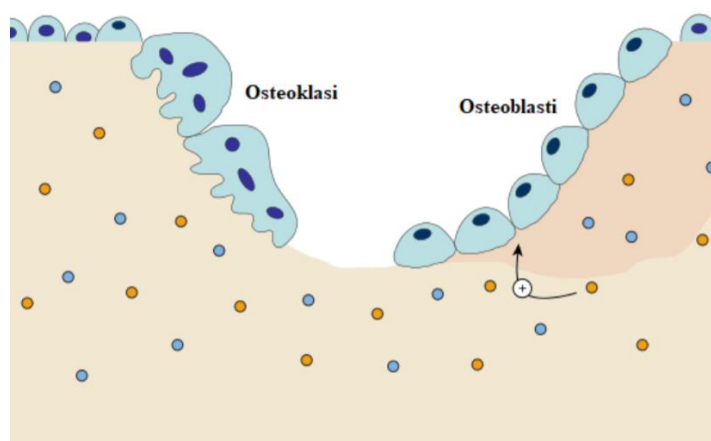
Procesom pregradnje kost se konstantno mijenja, ona se prilagođava vanjskim uvjetima (opterećenjima), koji djeluju na nju. Koštana pregradnja je proces koji traje cijeli život, međutim omjer između razgradnje i sintetiziranja kosti ovisi ne samo o uvjetima u kojima se čovjek nalazi već i o njegovoj starosti.

Proces koštane pregradnje sastoji se od tri uzastopne faze [Slika 25]:

1. resorpcije, tijekom koje osteoklasti "probavljaju" staru kost,
2. preraspodjele, kada se na površini kosti pojavljuju mononuklearne stanice,
3. formiranje kosti, kada osteoblasti sintetiziraju novu kost dok se potpuno ne zamijeni resorbirana kost.

Preoblikovanje kosti služi za prilagodbu arhitekture kostiju kako bi se zadovoljile mehaničke potrebe, također igra važnu ulogu u održavanju ravnoteže kalcija u tijelu.

Koštana pregradnja je upravo ono što omogućuje pomicanje zubi u željeni položaj uslijed ortodontske terapije.



Slika 25. Koštana pregradnja [14]

4. POREMEĆAJI POLOŽAJA ZUBI

U poremećaje položaja zubi spadaju: ektopija, *heterotopia dentis*, transpozicija, inklinacija, rotacija, bodily pomicanje, suprapozicija i infrapozicija. Nepravilnosti položaja pojedinih zuba i zubnih nizova se mogu ispreplitati [15].

4.1. *Ectopia dentis*

Ektopiju ili distopiju [Slika 26] definiramo kao nicanje zuba (bez obzira o kojem se zubu radi) van njegovog normalnog položaja [15]. Najčešća se radi o ektopiji trajnih gornjih prvih molara, očnjaka i drugih premolara, te donjih umnjaka, prvih molara i očnjaka.



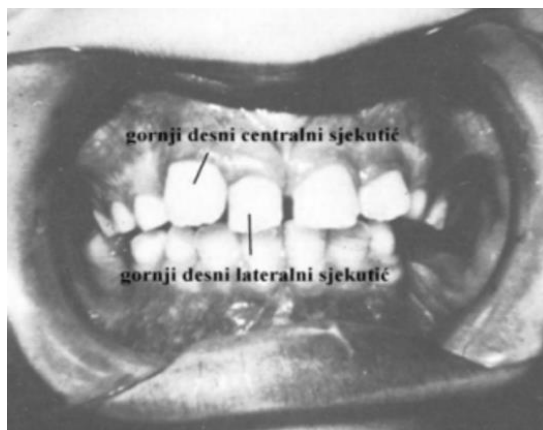
Slika 26. *Ectopia dentis* [15]

4.2. *Heterotopia dentis*

Ako je odstupanje u smještaju zuba mnogo veće od normalnog, onda takvo stanje nazivamo *heterotopia dentis*. To je najčešći slučaj s očnjakom, koji može biti smješten u maksilarnom sinus, orbiti, nosnoj šupljini, tvrdom nepcu ili u uzlaznom kraku donje čeljusti [15].

4.3. *Transposito dentis*

Transpoziciju definiramo kao zamjenu položaja dva susjedna zuba u zubnom nizu [15]. Parcijalna transpozicija podrazumijeva nepotpunu izmjenu mjesta dva zuba (zubi koji mijenjaju mjesta su izvan luka ili su nagnuti, pa su im samo krune zamijenile mjesta) [Slika 27]. Kod totalne transpozicije, zubi su u potpunosti zamijenili mjesta i nalaze se u luku. Moguć je veći pomak transponiranog zuba u mezijalnom ili distalnom smjeru. Parcijalne transpozicije su trostruko učestalije od totalnih. Kod parcijalne transpozicije, zubi se ortodontskom terapijom mogu dovesti na svoje mjesto, dok je to nemoguće kod potpune transpozicije. Uzroci transpozicije mogu biti: izmjena mjesta zubnih zametaka, nepravilan pravac pri nicanju zuba, patološki procesi (tlak od zubne ciste, infekcija), traume, iregularna resorpcija korijena mliječnog zuba, te nasljedna komponenta.



Slika 27. Transposito dentis [15]

4.4. Inklinacija

Inklinacija nastaje pomicanjem zuba oko bilo koje poprečne osi [15]. Razlikujemo centričnu inklinaciju, kada se zub naginje oko osi između apikalne i srednje trećine kliničkog korijena i ekscentričnu inklinaciju, gdje se zub naginje oko bilo koje druge poprečne osi. Određivanje pravca inklinacije se vrši na krunama zuba, koje mogu biti nagnute mezijalno, distalno, oralno i vestibularno. Vestibularna inklinacija objedinjuje labijalnu, kada su krune frontalnih zuba iskošene prema usnama, i bukalnu, gdje su krune premolara i molara iskošene prema obrazima. Pored ova osnovna četiri pravca, inklinacija može biti i u međupravcima: meziobukalni, distobukalni, mezioralni i distooralni. Uzroci inklinacije mogu biti: nepravilan položaj zametaka, prekobrojni zubi, perzistencija mliječnih zuba, rani gubitak mliječnih ili stalnih zuba, nedostatak prostora u zubnom nizu, patološki procesi (ciste, tumori, parodontopatija), trauma i nepravilno ortodontsko liječenje.

4.5. Rotacija

Rotaciju definiramo kao okretanje zuba oko uzdužne osi [Slika 28]. Ako je zub zaokrenut oko svoje centralne osi, govorimo o centričnoj rotaciji [15]. Ako se rotacija zbila oko bilo koje druge osi paralelne sa centralnom, radi se o ekscentričnoj rotaciji. Rotacija može varirati od blage meziolingualne ili distolingualne rotacije, pa do rotacije za 180° (takva rotacija najčešće pogađa sjekutiće i to učestalije trajne, nego mliječne). Tipična rotacija (meziorotacija) je djelomični zaokret zuba oko uzdužne osi na način da je mezio-aproksimalni brid krune orijentiran labijalno ili bukalno. Atipična rotacija (distorotacija) je djelomični zaokret zuba oko uzdužne osi na način da je disto-aproksimalni brid krune orijentiran labijalno ili bukalno. Rotacija nastaje najčešće zbog nedostatka prostora, genetski uzrokovanog nepravilnog položaja zametka zuba, prekobrojnih zuba ili pogrešnog ortodontskog liječenja.



Slika 28. Rotacija [15]

4.6. Bodily pomicanje

Bodily pomicanje [15] ili korporalni pomak nastaje djelovanjem sile kroz centar otpora zuba. Ova nepravilnost označava pomicanje zuba cijelim svojim tijelom na nenormalno mjesto. Prema pravcu, ovakvo pomicanje zuba može biti: mezijalno (duž luka, prema medijalnoj liniji), distalno (duž luka, suprotno od medijalne linije), oralno (zub u cijelosti stoji unutar zubnog niza) i vestibularno (zub stoji van zubnog niza). U većini slučajeva ova anomalija nastaje zbog pogrešnog položaja zubnih zametaka, iako je može prouzročiti i pogrešna ortodonska terapija fiksnim aparatima.

4.7. Suprapozicija

Suprapozicija [Slika 29] se odlikuje previše izniklim zubima, čije okluzalne površine ili rubovi prelaze iznad okluzalne ravnine [15]. Uzrok nastanka ove vertikalne nepravilnosti je najčešće gubitak zuba antagonista. Frontalni zubi koji se nalaze u suprapoziciji, a uz to su zbog drugih ortodontskih anomalija dodatno prominirani, podložniji su traumatskim frakturama, nego zubi čije su okluzalne površine i incizalni bridovi u jednoj ravnini.



Slika 29. Suprapozicija [15]

4.8. Infrapozicija

Infrapozicija [Slika 30] je vertikalna nepravilnost položaja zuba, kod koje okluzalna površina ili incizalni rub nije dosegao okluzalnu ravninu [15]. Za takav zub kažemo da nije dovoljno izrastao. Razlikujemo privremenu (zub je u nicanju) od trajne infrapozicije (zub je zbog neke prepreke ili pogrešnog položaja zaustavljen u nicanju). Infrapozicija se javlja u obje denticije, s tim da je češća u trajnoj. U mliječnoj denticiji se većinom radi o ankilozi mliječnih molara, jer proces resorpcije ne teče kontinuirano, nego se faze resorpcije izmjenjuju sa fazama reparacije. Najčešće je ankiloziran drugi donji mliječni molar. S obzirom da susjedni zubi normalno izbijaju dalje, takav zub ostaje u infrapoziciji (potonuli zub). U trajnoj denticiji se najčešće u infrapoziciji nalaze očnjaci i drugi premolari. Infrapozicija uglavnom nastaje zbog nedostatka prostora, prekobrojnih zuba, pogrešne ortodonske terapije i patoloških procesa.



Slika 30. Infrapozicija [15]

5. ORTODONCIJA

Ortodoncija ili dentalnofacijalna ortopedija je polje stomatologije koje se primarno bavi nepravilnim položajem zubi i čeljusti te njihovom dijagnozom, prevencijom i korekcijom [6]. Sama riječ ortodoncija dolazi od grčkih riječi *orthos* – ispraviti, izravnati i *odont* – zub, a označava glavni cilj ortodontske terapije – ispravljanje položaja zubi. Ortodontska terapija nije važna samo zbog lijepog osmijeha, nego i radi dobrobiti cijelog žvačnog sustava. Nepravilni zagriz utječe na čeljusni zglob i dolazi do neravnomjernog trošenja zubi i neravnomjerne raspodjele sila na zube, što ujedno štetno djeluje na zubno meso. Zbijeni zubi otežavaju čišćenje te pogoduju nastanku karijesa i parodontitisa – upale potpornog tkiva zuba. Uobičajeni tretman za malokluziju traje oko 2 godine, ovisno o stanju pojedinog pacijenta i o postupku, odnosno napravi za vraćanje pravilne okluzije. Malokluzija nije bolest, nego niz dentalnofacijalnih varijacija koje u većoj ili manjoj mjeri utječu na oralno zdravlje i kvalitetu života. Okluzija se može definirati kao međusobni odnos zubi u zubnom nizu te odnos zubi u odnosu na susjedne zube u antagonističkom zubnom nizu. Ortodontska terapija može biti mobilna i fiksna.

5.1. Mobilna ortodontska naprava

Mobilne ortodontske naprave sastoje se od akrilatne baze i žica savinutih u različite oblike, ovisno o anomaliji [Slika 31]. Žica čini cjelinu s bazom, a baza često ima vijke koji joj omogućuju širenje i stvaranju ortodontske sile [16]. Različitim konstrukcijama baze i žice postižu se ortodontske sile koje djeluju onoliko dugo koliko pacijent napravu nosi u ustima. Nošenje se najčešće planira tijekom noći i tijekom vremena koje pacijent provodi kod kuće jer mobilna ortodontska naprava uzrokuje govorne smetnje. Veliki nedostatak svih mobilnih naprava je upravo mogućnost njihova skidanja, što znači da je vrijeme nošenja naprave pod potpunom kontrolom pacijenta.



Slika 31. Mobilna ortodontska naprava [16]

5.2. Fiksna ortodonska naprava

Fiksne naprave sastoje se od bravica, prstena i žice [Slika 32]. Bravice su elementi koji se učvršćuju na zube, a na svojoj površini imaju utor predviđen za smještaj žice [16]. Žica, postavljena u uture bravica, svojim elastičnim svojstvima proizvodi ortodonsku silu koja uzrokuje pomak zubi. Iznos sile ovisi o svojstvima žice (materijalu, debljini, obliku), a smjer djelovanja sile određuje se oblikom i konstrukcijom bravica. Najstarija generacija bravica je izrađena od metala, a u novije vrijeme sve se češće primjenjuju keramičke i kompozitne bravice. Uobičajeno je da se bravice postavljaju na prednje plohe zubi, no mogu se postavljati i na stražnje plohe. Na stražnje zube postavljaju se prsteni koji stvaraju čvrsto uporište, a najčešće se izrađuju od nehrđajućeg čelika. Prsteni se dentalnim cementima fiksiraju na zub. Za cementiranje se koriste kompoziti staklenih ionomera i smolastih materijala koji otvrdnjavaju svjetlom, a za lijepljenje bravica koriste se akrilne smole. Bitno je naglasiti da materijali bravica i prstena te vrsta veziva moraju biti kompatibilni. Kroz svaku bravicu, od jednog prstena do drugog, provlači se već spomenuta žica koja se ponaša kao fleksijska ili torzijska opruga pa se mora izraditi od elastičnog materijala, a treba imati što višu granicu tečenja i prije loma doživjeti plastično očvršnuće. Od materijala se traži da naprezanja što sporije padaju s povećanjem deformacije kako sila na zub ne bi prebrzo pala. Žičani luk se najčešće izrađuje od legura nikla i titana.

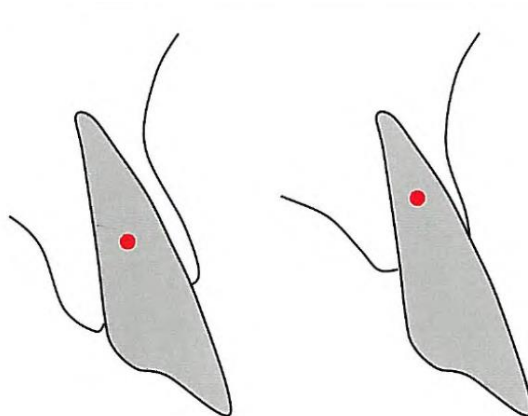


Slika 32. Fiksna ortodonska naprava [16]

5.3. Pomaci uslijed ortodonske terapije

Fiksni ili mobilni aparati za zube uzrokuju stvaranje ortodonskih sila na zube. Ortodonske sile opterećuju zube i na taj ih način pomiču u željeni položaj. Način aplikacije sile može biti kontinuiran, opadajući, intermitentan (ponavljajući) i funkcionalan [17]. Osim načina aplikacije sile, bitno je i njeno trajanje. Jake kratkotrajne sile mogu biti manje štetne od trajnih slabih sila. U kliničkoj praksi, ovi pokreti zuba definirani su kao naginjanje (kontrolirano i nekontrolirano), translacija, intruzija, ekstruzija, gibanje korijena, rotacija te njihove

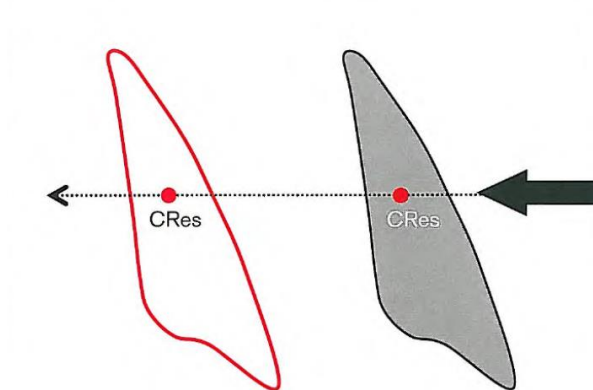
kombinacije. Centar otpora je točka na zubu u kojoj, kada djeluje sila, dolazi do translacije zuba. Centar otpora različit je za različite zube s različitom duljinom korijena i anatomijom. Njegova pozicija također ovisi o visini alveolne kosti pa će biti različita kod djece i odraslih, a osobito kod pacijenata s bolesti parodonta gdje se centar otpora pomiče prema korijenu zuba [Slika 33].



Slika 33. Centar otpora [18]

5.3.1. Translacija

Tijekom translacije zuba, sve točke na zubu pomiču se u istom smjeru i za isti pomak [Slika 34]. Prilikom translacije dolazi do jednolikog naprezanja u parodontnom ligamentu, a iznos je i do 30% manji od naprezanja prilikom naginjanja zuba [19].



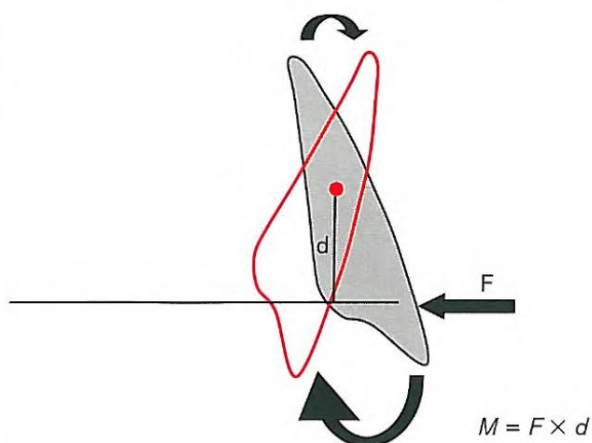
Slika 34. Translacija [18]

5.3.2. Nagib

Naginjanje oko centra rotacije u području korijena zuba izazvano je djelovanjem sile u jednom smjeru. Parodontni ligament će biti najviše deformiran na rubu alveolne kosti u smjeru pomaka zuba. Ova vrsta pomaka dobiva se malim kontinuiranim silama [19]. Naginjanje zuba

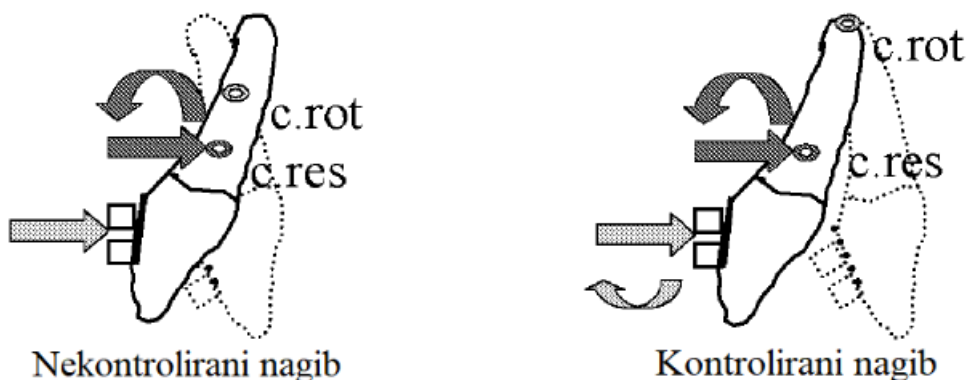
ovisi o mjestu na kojem djeluje sila. Stoga postoje dva tipa naginjanja: nekontrolirano i kontrolirano.

Nekontrolirano naginjanje se javlja kada je sila smještena na kruni zuba pri čemu se kruna giba u jednu stranu dok se korijen giba u drugu stranu [Slika 35]. Centar rotacije je blizu centra otpora pa se zub naginje oko centra otpora. Prilikom nekontroliranog naginjanja stvara se moment koji je jednak umnošku sile i kraka koji se uzima kao 10mm, te je zapravo u ortodonciji konvencijom određeni podatak [19].



Slika 35. Nagib [18]

Kod kontroliranog naginjanja, kruna zuba se giba u smjeru sile, ali pozicija korijena ostaje ista ili se minimalno giba. Centar rotacije se nalazi na vrhu korijena i oko njega se zub naginje. Usporedba nekontroliranog i kontroliranog nagiba vidljiva je na Slici 36.

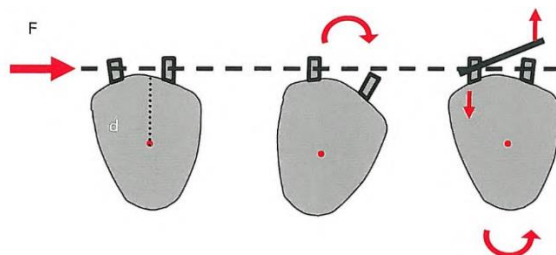


Slika 36. Nekontrolirani i kontrolirani nagib [20]

5.3.3. Rotacija

Rotacije se izvode najbolje djelovanjem padajućih sila s periodima stabilizacije i relativnom dugom retencijom [19]. Centar rotacije je točka oko koje se tijelo rotira, tj. točka na osi koja ostaje nepomična tijekom gibanja [Slika 37]. Ona ovisi o položaju centra otpora i sili

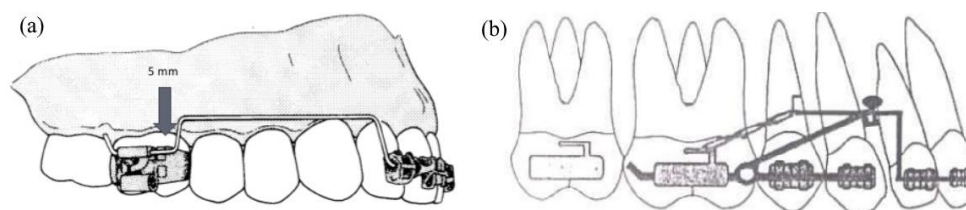
koja djeluje na tijelo. Čista rotacija se događa kada je centar rotacije beskonačno udaljen od centra otpora.



Slika 37. Primjer rotacije [18]

5.3.4. Intruzija

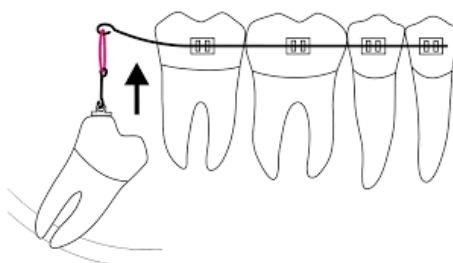
Intruzija zubi je obično relativna. Pri tom zahvatu ne smiju se upotrijebiti jače sile zbog opasnosti resorpcije. Intruzija zuba je pomak u ortodonciji gdje se zub djelomično giba unutar kosti. Ovaj tip pomaka također se koristi u ortodonciji kako bi se popravio nepravilan zagriz, odnosno, vraćanje zuba u okluzijsku ravninu. Na razne načine je moguće kreirati ovakav tip pomaka. Najpoznatiji među njima su Rickett Utility intruzijski luk i Three-Piece intruzijski luk koji su prikazani na Slici 38 [19].



Slika 38. (a) Rickett Utility intruzijski luk, (b) Three-Piece intruzijski luk [19]

5.3.5. Ekstruzija

Ekstruzija se optimalno izvodi laganim kontinuiranim silama. Vrlo slično intruziji, no u ovom postupku dolazi do pomaka zuba prema antagonistima, dok se kod intruzije zub udaljava od antagonista [Slika 39].



Slika 39. Ekstruzija [19]

5.4. Sile uslijed ortodonske terapije

Iznos sile jedan je od bitnih faktora u ovim razmatranjima. Ako sila djeluje duže, može doći i do nekroze (odumiranja) tkiva [17].

Sile koje se u ortodontici primjenjuju mogu se, s obzirom na njihov izvor, podijeliti u dvije skupine: funkcionalne i mehaničke.

Funkcionalne sile proizlaze iz funkcije žvačnih mišića i mišića obraza, usana i jezika, koji elastično okružuju zubne lukove. Ta vrsta sila ima veliku ulogu posebno u vrijeme razvoja i, prema nekim autorima, direktno određuje oblik zubnog luka. Dok jedna skupina autora smatra da te sile otežavaju ortodontsku terapiju, druga nastoji upravo primjenom tih sila korigirati anomalije. Obje skupine se slažu u tome da nakon terapije sve sile treba dovesti u ravnotežu, kako bi se spriječilo recidiv [17].

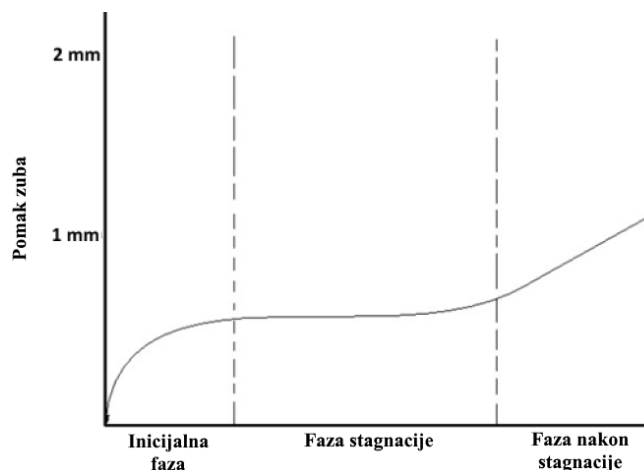
Mehaničke sile su umjetne sile, a prenose se žicom, gumicom ili vijkom. Budući da svaka sila, prema zakonu akcije i reakcije, izaziva sebi jednaku silu suprotnog smjera, ortodonska naprava treba imati svoj aktivni dio kojim pomiče zub i reaktivni dio, tj. sidrište.

Najbolji rezultati postižu se manjim konstantnim silama. Optimalne sile preporučene u ortodontskoj terapiji su između 0,2 N i 5 N [21].

5.5. Faze pomicanja zuba

Iz kliničke perspektive pomicanje zuba ima tri izražene faze [Slika 40] [21]:

- *Inicijalnu fazu*: u ovoj fazi pomicanje zuba jasno je vidljivo odmah po početku terapije, no ne dolazi do koštane pregradnje, trajanje inicijalne faze je vrlo kratko i pomaci su mali
- *Faza stagnacije*: u ovoj fazi zub miruje ili mu je pomak minimalan, trajanje ove faze varira te ovisi o veličini primijenjene sile
- *Faza nakon stagnacije*: dolazi do pomaka koji je direktno povezan s koštanom pregradnjom, odnosno resorpcijom i stvaranjem novog koštanog tkiva, ovisno o djelovanju sile, ova faza može trajati i do dvije godine.



Slika 40. Faze pomicanja zuba [21]

6. METODOLOGIJA I REZULTATI

U skladu s ciljem rada, potrebno je na temelju CT snimki izraditi model zuba s okolnim tkivom, za određenog pacijenta, prije i poslije ortodontske terapije koja je trajala 16,5 mjeseci. Takav model naziva se personalizirani model.

6.1. Mimics

Za dobivanje modela zubi iz CT snimaka poslužio je programski paket Mimics (Mimics Innovation Suite Research Edition 17.0.0.435, Materialise, Leuven, Belgium)

Programski paket Mimics razvijen je za obradu medicinskih slika. Mimics se koristi za segmentaciju 3D medicinskih slika (koje su dobivene snimanjem pomoću CT-a, MRI-a, micro-CT-a, CT-a s koničnom zrakom-CBCT, 3D ultrazvuka), a rezultirat će točnim 3D modelom pacijentove anatomije [22]. Ti modeli se koriste za različite inženjerske primjene. Proizvodi Mimicsa su: Mimics, 3-Matic, PROPLAN CMF i Mimics Innovation Suite.

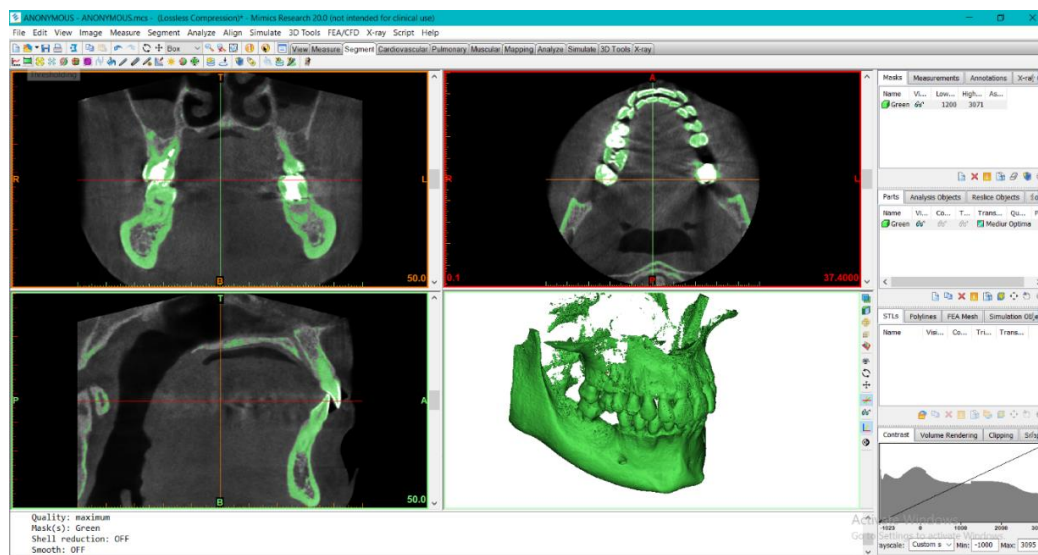
6.1.1. Računalna tomografija

Glavna prednost CT-a, odnosno računalne tomografije, pred klasičnim radiološkim metodama je u mogućnosti mjerenja gustoće pojedinog dijela, točnoj procjeni veličine i odnosa sa susjednim anatomskim strukturama. Glavni dijelovi CT-uređaja su pokretni stol na kojem leži pacijent, kućište u kojem se nalazi rendgenska cijev i detektori, potom generator, komandni stol i radni stol s monitorom za obavljanje pregleda te računalo.

CT snimka sastoji se od nekoliko desetaka do nekoliko stotina pojedinačnih rezova u različitim nijansama sive boje. Oni se mogu ocijeniti pojedinačno i pružiti velike koristi za nadolazeće stomatološke tretmane, primjerice simuliranjem implantacije na računalu sa stvarnim podacima pacijenta. Koristeći suvremene CT uređaje (višedetektorske CT uređaje spiralne tehnologije), postoje velike mogućnosti rekonstrukcije slike npr. multiplanarne rekonstrukcije i 3D rekonstrukcije [Slika 41].

Tvari se različito prikazuju na snimci:

- zrak: crno
- masno tkivo: sivo
- meko tkivo: različite nijanse sive boje
- kost, zubi: bijelo



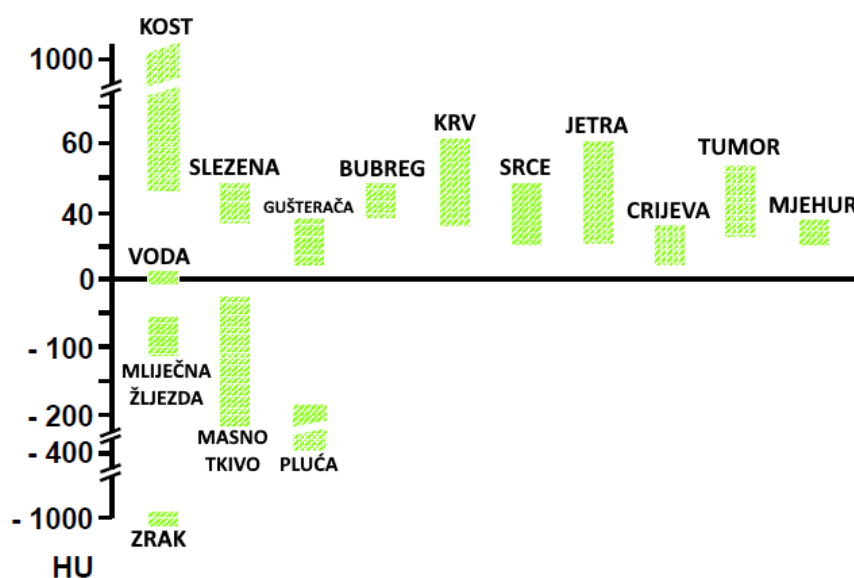
Slika 41. 3D model napravljen iz CT snimke

6.2. Izrada modela

Potrebno je izraditi model dva susjedna jednokorijenska sjekutića s parodontnim ligamentima i kosti koja se sastoji od spužvastog i kortikalnog dijela za stanje prije i nakon terapije.

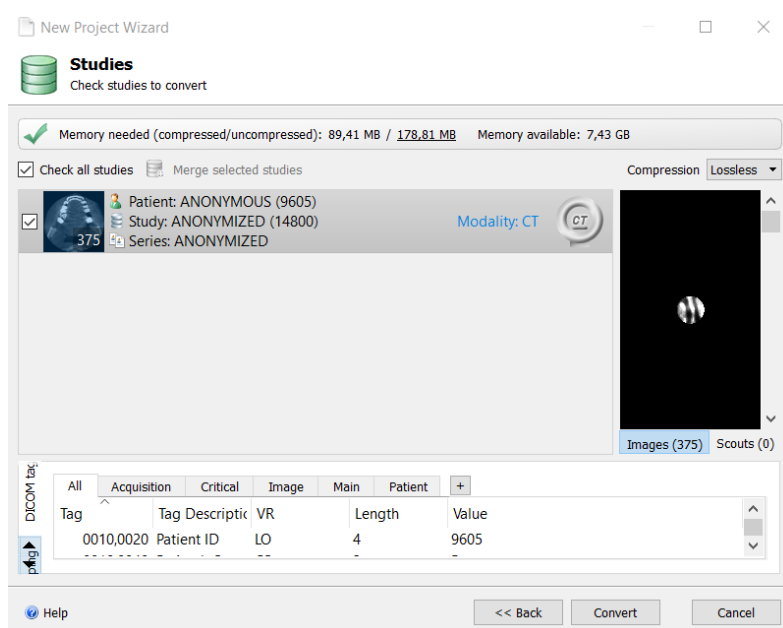
Broj CT snimaka učitanih u Mimics je 375, a svaka snimka ima 250000 piksela. HU je jedinica Hounsfieldove ljestvice finog razlučivanja gustoće u računalnoj tomografiji. Definirana je tisućinkom koeficijenta gušenja rendgenskog zračenja u vodi koja ima 0 HU.

HU vrijednosti, ovisno o vrsti promatranog tkiva, prikazane su u dijagramu na slici 42.



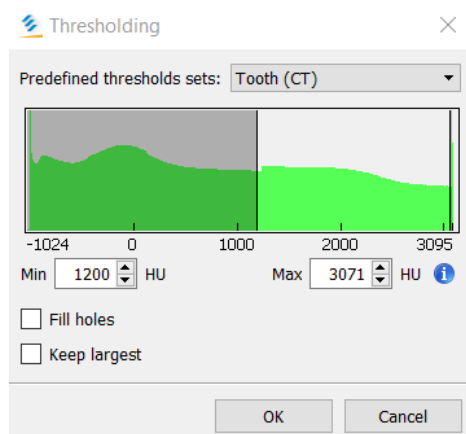
Slika 42. Dijagram HU vrijednosti [21]

Za oba stanja (prije i nakon terapije) postupak izrade modela odvija se na isti način. Prvi korak je učitavanje CT snimki u Mimics [Slika 43].

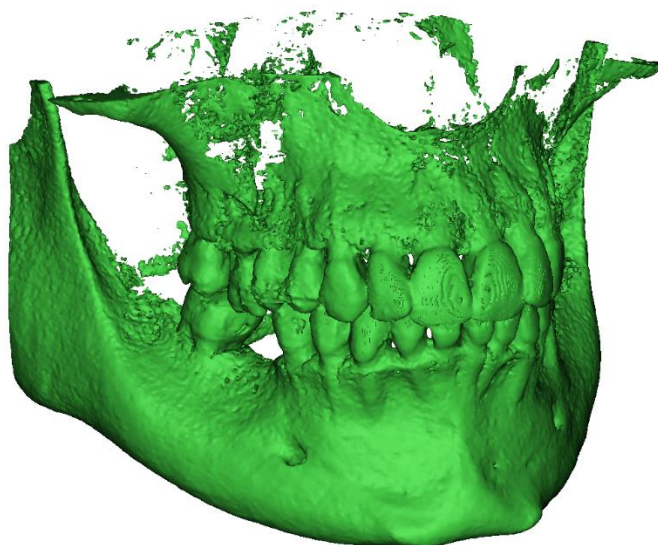


Slika 43. Učitavanje CT snimki

Nakon učitavanja snimke, pomoću funkcije *Thresholding* [Slika 44] izrađujemo prvu masku. Maska će se sastojati od zubi i kosti, odnosno Mimics će prepoznati s CT-a sve piksele koji odgovaraju zadanoj vrijednosti HU (za zub to je između 1200 i 3071), te će od njih napraviti masku. Zbog raznih smetnji u CT snimci, 3D model prve maske [Slika 45] neće u potpunosti odgovarati željenom prikazu, već će na pojedinim mjestima imati manjak, dok na drugima višak materijala.

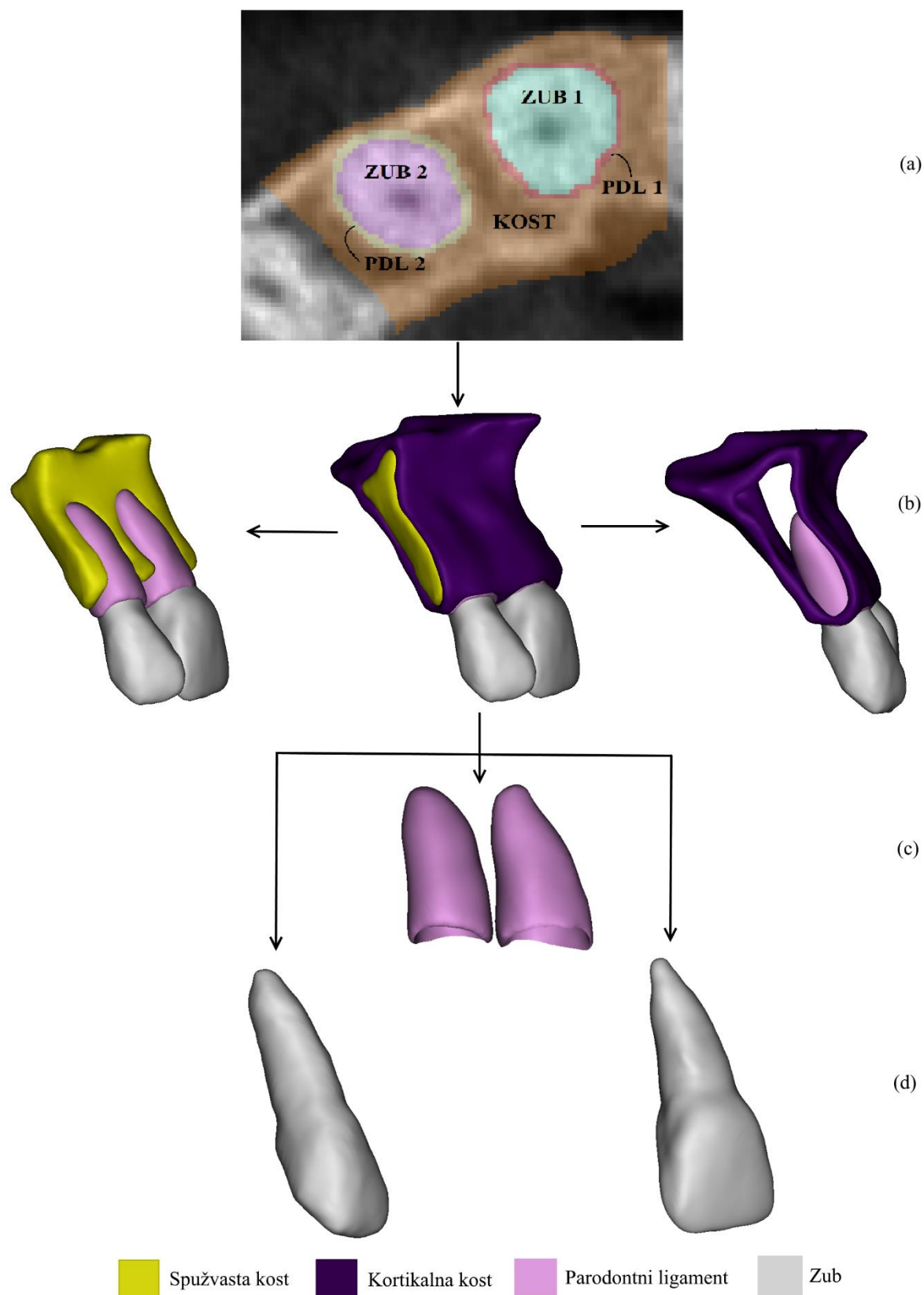


Slika 44. Thresholding

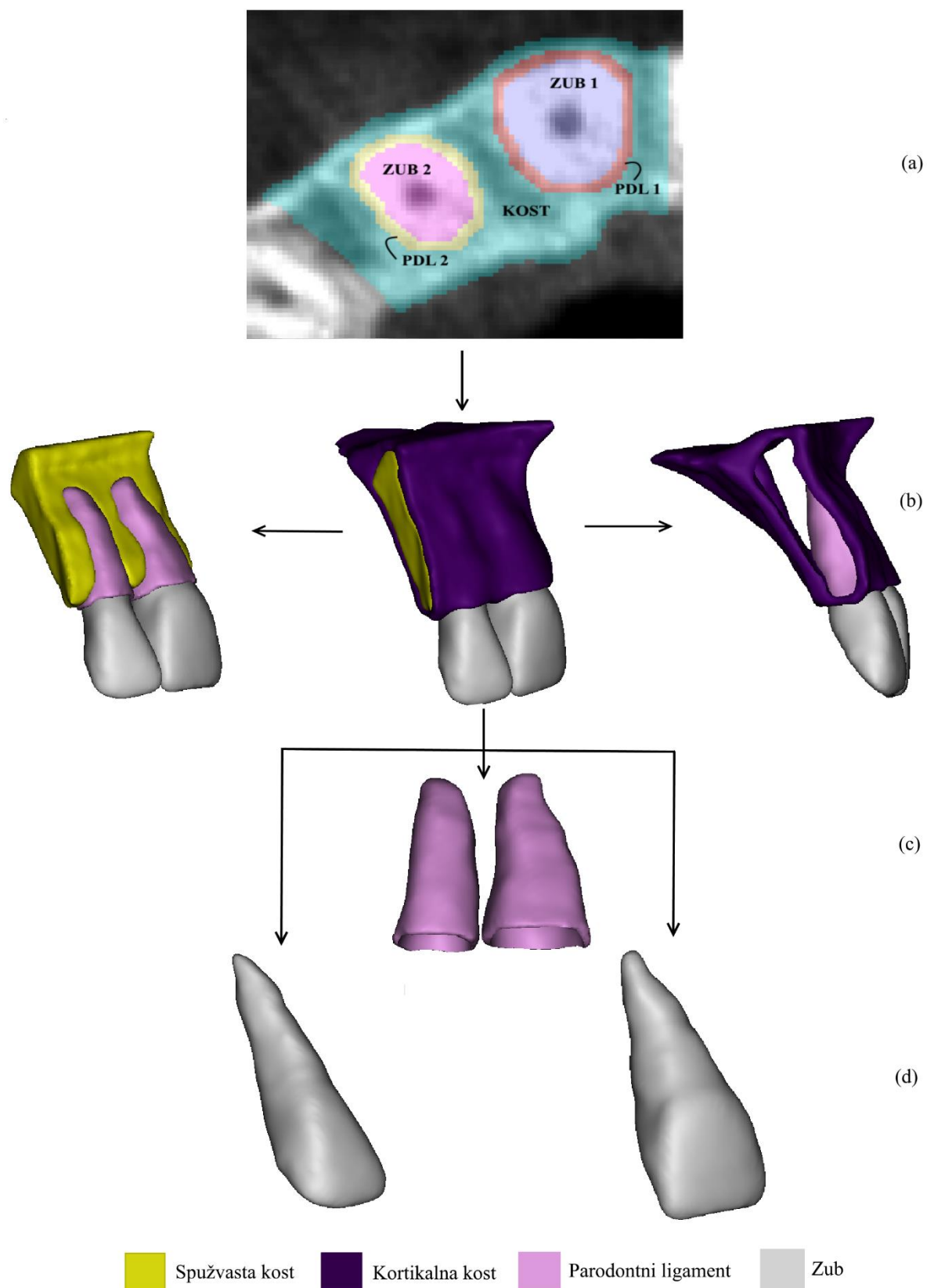


Slika 45. 3D model prve maske

U sljedećim koracima uklanjamo višak prve maske te izdvajamo zasebne maske željenih zubi, parodontnih ligamenata te okolne kosti. Neke od funkcija koje nam to omogućuju su *Edit Mask*, *Multiple Slice Edit*, *Boolean Operations* i druge. U zadnjem koraku dobiveni 3D modeli se uređuju pomoću funkcija *Smooth* i *Wrap*. Tijek izrade modela za oba stanja prikazan je na Slikama 46 i 47.



Slika 46. Izrada modela prije terapije - (a) Maske kosti, zuba i parodontnih ligamenata, (b) Spužvasta i kortikalna kost, (c) Parodontni ligamenti, (d) Modeli zuba 2 i zuba 1



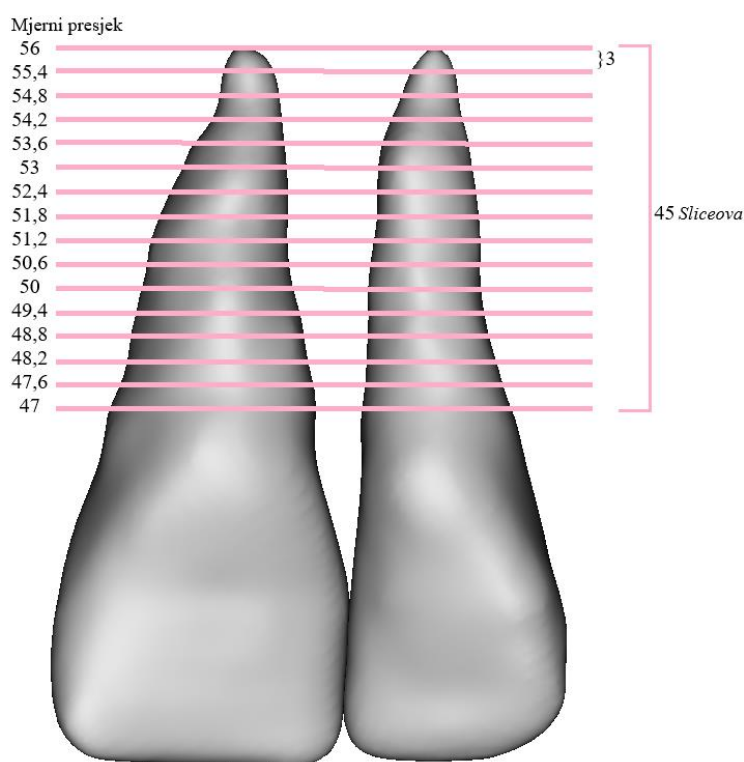
Slika 47. Izrada modela nakon terapije - (a) Maske kosti, zuba i parodontnih ligamenata, (b) Spužvasta i kortikalna kost, (c) Parodontni ligamenti, (d) Modeli zuba 2 i zuba 1

6.3. Očitavanje gustoće alveolne kosti prije i nakon terapije

Tijekom ortodontske terapije dolazi do promjene gustoće kosti koja se nalazi neposredno uz zub. Promjena gustoće posljedica je koštane pregradnje te ovisi o smjeru pomaka zuba. Na mjestima u smjeru pomaka zuba kost se razgrađuje te gustoća pada s obzirom na početnu vrijednost, dok u suprotnom smjeru dolazi do povećanja gustoće okolne kosti. Gustoća se mjeri očitavanjem HU vrijednosti u karakterističnim točkama oko oba zuba.

Odabrano je ukupno šest karakterističnih točaka za svaki zub od kojih se tri nalaze u labijalnom području, a tri u lingualnom [Slike 49 i 50]. Poželjno je pritom da su mjerne površine što manje te da su postavljene što bliže parodontnog ligamenta.

Mjerenje je obavljeno za 16 presjeka [Slika 48] s 12 karakterističnih točaka po presjeku, čime je pokriveno područje od 45 *sliceova*, te je ukupno očitano 384 vrijednosti za oba stanja. Pomoću očitanih vrijednosti stvorena je baza podataka prema kojoj se može usporediti stanje prije i nakon terapije za određeno područje.

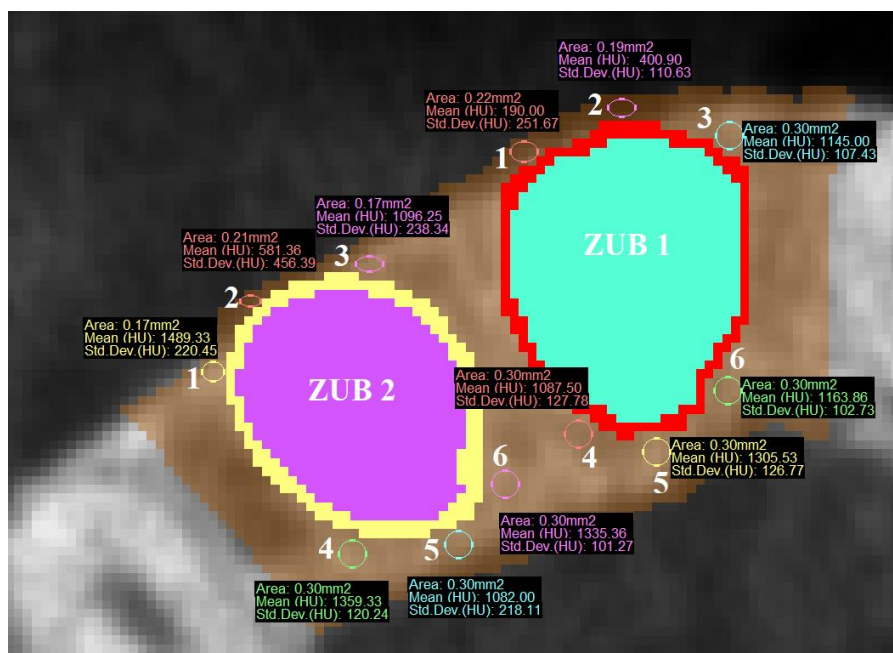


Slika 48. Prikaz mjernih presjeka

6.3.1. Rezultati očitavanja gustoće

Za svaki zub očitano je šest vrijednosti po mjernom presjeku. Na labijalni smjer odnose se točke 1, 2 i 3, a na lingualni 4, 5 i 6 [Slika 49, 50]. Za jednostavnije uspoređivanje rezultata napravljen je prosjek u labijalnom i lingualnom smjeru za svaki mjerni presjek. Rezultati su prikazani u Tablici 2, 3, 4 i 5.

6.3.1.1. Prije terapije



Slika 49. Položaj karakterističnih točki oko zuba prije terapije

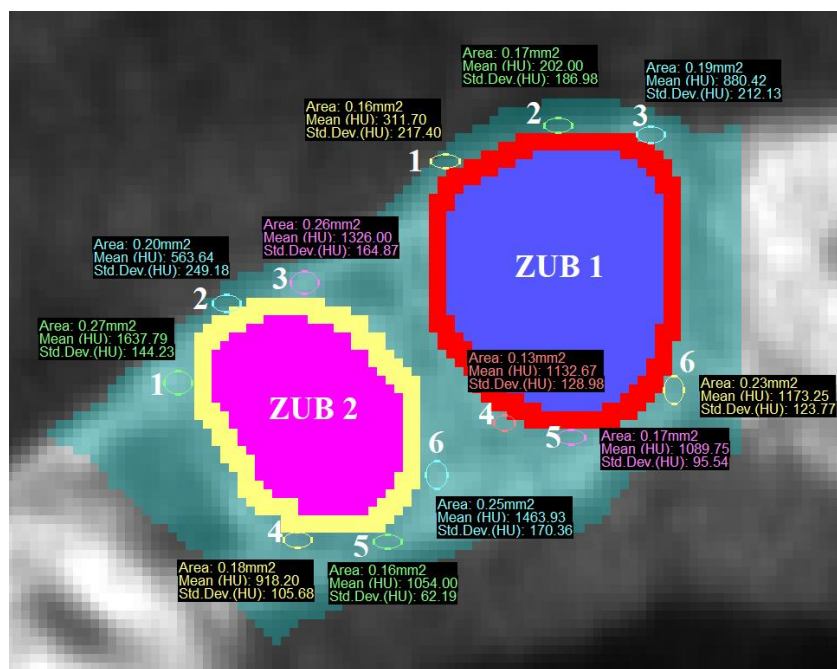
Tablica 2. Zub 1 - Gustoće prije terapije (HU)

Točka/ Presjek	1	2	3	4	5	6	Prosjek Labijalno	Prosjek Lingualno
47,0	311,70	447,81	880,42	1087,50	1305,53	1163,86	546,64	1185,63
47,6	573,88	412,50	279,91	1251,93	1179,57	1009,00	422,10	1146,83
48,2	899,18	549,00	964,00	1346,93	1170,79	1289,54	804,06	1269,09
48,8	800,00	570,00	918,25	1318,73	1201,14	1034,79	762,75	1184,89
49,4	909,88	634,50	732,90	1240,21	1252,93	1033,93	759,09	1175,69
50	404,75	678,33	1112,00	1409,07	1354,79	1115,47	731,69	1293,11
50,6	452,10	857,50	1119,67	886,25	1231,14	1277,67	809,76	1131,69
51,2	700,00	887,67	963,75	929,93	924,29	1508,07	850,47	1120,76
51,8	451,00	811,00	886,92	1296,47	1000,00	1395,80	716,31	1230,76
52,4	421,11	804,00	1293,83	1317,80	996,75	1311,77	839,65	1208,77
53	592,75	894,67	1349,08	1441,80	1061,63	1226,43	945,50	1243,29
53,6	631,91	821,33	957,33	1488,64	964,31	1201,13	803,52	1218,03
54,2	614,09	880,33	947,67	1405,86	1037,00	1426,43	814,03	1289,76
54,8	588,00	941,00	1002,23	1368,71	930,07	1336,19	843,74	1211,66
55,4	442,83	971,33	869,68	1306,50	1059,75	1453,30	761,28	1273,18
56	405,27	876,20	958,86	1289,20	1015,25	1281,33	746,78	1195,26

Tablica 3. Zub 2 - Gustoće prije terapije (HU)

Točka/ Presjek	1	2	3	4	5	6	Prosjek Labijalno	Prosjek Lingualno
47,0	1489,33	581,36	1096,25	1080,00	1200,25	1172,67	1055,65	1150,97
47,6	1481,58	529,00	1233,09	1046,50	1119,75	1370,00	1081,22	1178,75
48,2	1461,17	1079,00	1387,50	1077,00	1301,25	1022,75	1309,22	1133,67
48,8	1422,58	1047,30	1303,43	971,25	1181,00	1268,75	1257,77	1140,33
49,4	1440,75	966,27	1325,62	912,25	1182,00	930,50	1244,21	1008,25
50	1634,92	870,58	1717,27	1057,25	1219,50	1005,50	1407,59	1094,08
50,6	1641,20	980,10	1437,43	1056,67	1259,25	949,50	1352,91	1088,47
51,2	1531,44	732,64	1433,57	992,50	846,25	1021,25	1232,55	953,33
51,8	1312,00	712,33	1052,14	996,00	1051,50	988,75	1025,49	1012,08
52,4	1129,27	648,00	1243,73	1046,67	1098,50	978,50	1007,00	1041,22
53	1165,71	554,36	1309,33	1233,33	1202,25	986,00	1009,80	1140,53
53,6	1273,59	489,00	1668,60	1180,33	1015,25	937,17	1143,73	1044,25
54,2	1125,93	389,70	1667,50	1304,50	817,75	1039,00	1061,04	1053,75
54,8	1414,44	526,60	1433,64	1255,00	1266,00	941,67	1124,89	1154,22
55,4	1623,67	471,11	1539,55	1436,75	1285,00	1108,58	1211,44	1276,78
56	1554,90	1233,50	1434,91	1295,50	1250,00	1149,42	1407,77	1231,64

6.3.1.2. Nakon terapije



Slika 50. Položaj karakterističnih točki oko zuba nakon terapije

Tablica 4. Zub 1 - Gustoća nakon terapije (HU)

Točka/ Presjek	1	2	3	4	5	6	Prosjek Labijalno	Prosjek Lingualno
47,0	900,23	741,50	1016,00	933,20	908,00	945,60	885,91	928,93
47,6	963,33	873,22	1239,38	1074,25	1152,40	987,25	1025,31	1071,30
48,2	908,67	808,22	1028,90	937,80	1072,00	899,50	915,26	969,77
48,8	1047,86	880,10	1072,67	980,10	1264,60	832,50	1000,21	1025,73
49,4	1223,75	1071,83	1144,88	979,22	1251,50	697,92	1146,82	976,21
50	927,00	913,33	1314,17	1173,67	1246,75	875,50	1051,50	1098,64
50,6	775,29	1084,44	1206,00	936,33	1081,63	935,07	1021,91	984,34
51,2	612,50	838,67	1086,67	1157,70	1046,30	1064,00	845,95	1089,33
51,8	230,50	542,17	816,67	1270,33	1092,33	1297,00	529,78	1219,89
52,4	307,71	500,50	852,67	1354,50	1309,40	1264,80	553,63	1309,57
53	497,33	573,17	1318,00	1316,25	1346,25	1539,67	796,17	1400,72
53,6	444,75	762,50	1049,00	1449,50	1325,00	1505,60	752,08	1426,70
54,2	394,25	768,80	1159,40	1529,33	1328,00	1415,50	774,15	1424,28
54,8	232,20	718,20	961,83	1565,50	1296,20	1453,50	637,41	1438,40
55,4	448,20	687,33	884,67	1594,25	1210,33	1337,00	673,40	1380,53
56	344,75	478,33	901,50	1323,00	1207,67	1483,25	574,86	1337,97

Tablica 5. Zub 2 - Gustoća nakon terapije (HU)

Točka/ Presjek	1	2	3	4	5	6	Prosjek Labijalno	Prosjek Lingualno
47,0	1637,79	563,64	1326,00	991,50	860,33	1197,50	1175,81	1016,44
47,6	1585,69	985,09	1456,67	1075,50	817,50	1010,25	1342,48	967,75
48,2	1344,42	1129,10	1726,58	1047,50	872,25	1052,40	1400,03	990,72
48,8	1521,75	1220,13	1688,38	1197,50	1012,62	988,50	1476,75	1066,21
49,4	1603,07	1316,09	1989,83	857,20	1008,40	1014,90	1636,33	960,17
50	1586,79	1057,55	1906,00	760,60	1045,25	1084,00	1516,78	963,28
50,6	1699,54	1024,38	1928,17	773,60	1120,50	1155,55	1550,70	1016,55
51,2	1487,80	688,70	1690,58	1066,10	1018,63	1036,91	1289,03	1040,55
51,8	1167,92	461,50	1444,50	1112,00	1125,00	1435,41	1024,64	1224,14
52,4	1225,93	477,50	1306,57	1331,50	1095,50	1207,00	1003,33	1211,33
53	1134,67	467,25	1369,17	1274,00	1061,75	1304,00	990,36	1213,25
53,6	965,75	516,45	1055,85	1374,33	1321,25	1075,50	846,02	1257,03
54,2	618,93	831,36	1335,09	1394,30	990,45	1223,45	928,46	1202,73
54,8	627,36	310,58	931,00	1360,73	1125,75	1220,30	622,98	1235,59
55,4	598,50	298,91	1070,83	1311,91	1058	1557,36	656,08	1309,09
56	556,89	459,80	1344,38	1362,64	1173,64	1370,3	787,02	1302,19

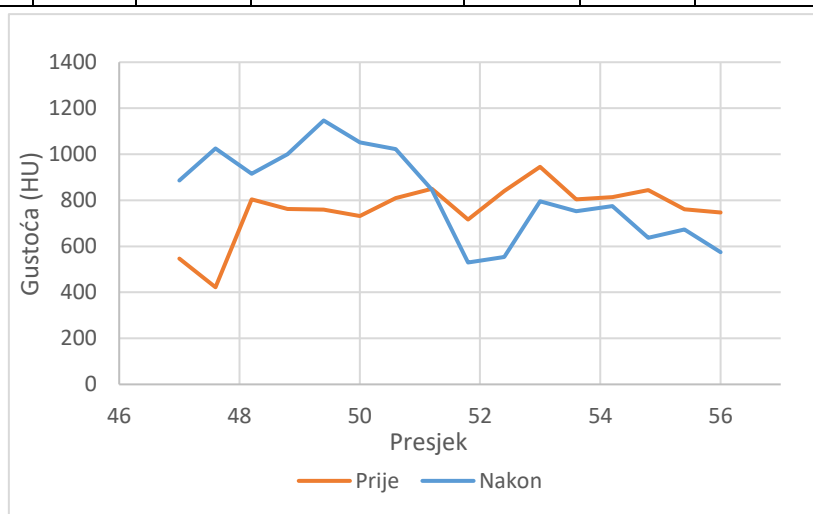
6.3.2. Usporedba rezultata očitavanja gustoća

Usporedbu rezultata prikazana je tablično [Tablica 6, 7] i grafički [Slika 51, 52, 54, 55].

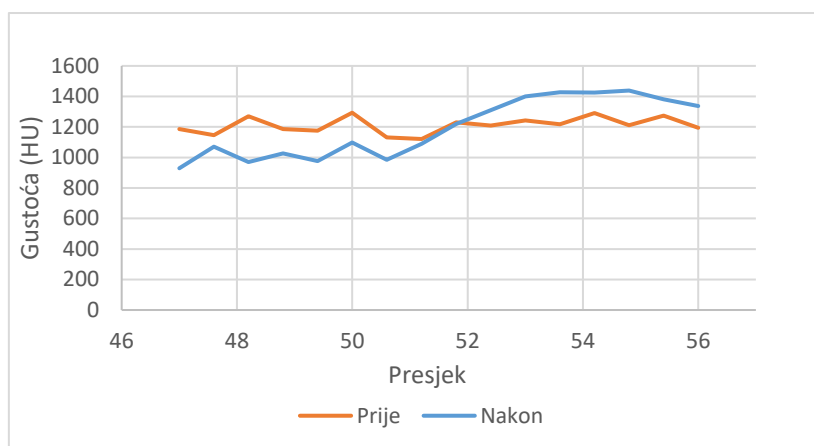
6.3.2.1. Zub 1

Tablica 6. Zub 1 - Promjena gustoće prije i nakon terapije

Mjerni Presjek	Labijalno			Lingualno		
	Prije	Nakon	$\frac{HU_{Nakon}}{HU_{Prije}} \cdot 100\%$	Prije	Nakon	$\frac{HU_{Nakon}}{HU_{Prije}} \cdot 100\%$
47	546,64	885,91	162,06 %	1185,63	928,93	78,35 %
47,6	422,10	1025,31	242,91 %	1146,83	1071,30	93,41 %
48,2	804,06	915,26	113,83 %	1269,09	969,77	76,41 %
48,8	762,75	1000,21	131,13 %	1184,89	1025,73	86,57 %
49,4	759,09	1146,82	151,08 %	1175,69	976,21	83,03 %
50	731,69	1051,50	143,71 %	1293,11	1098,64	84,96 %
50,6	809,76	1021,91	126,20 %	1131,69	984,34	86,98 %
51,2	850,47	845,95	99,47 %	1120,76	1089,33	97,20 %
51,8	716,31	529,78	73,96 %	1230,76	1219,89	99,12 %
52,4	839,65	553,63	65,94 %	1208,77	1309,57	108,34 %
53	945,50	796,17	84,21 %	1243,29	1400,72	112,66 %
53,6	803,52	752,08	93,60 %	1218,03	1426,70	117,13 %
54,2	814,03	774,15	95,10 %	1289,76	1424,28	110,43 %
54,8	843,74	637,41	75,55 %	1211,66	1438,40	118,71 %
55,4	761,28	673,40	88,46 %	1273,18	1380,53	108,43 %
56	746,78	574,86	76,98 %	1195,26	1337,97	111,94 %

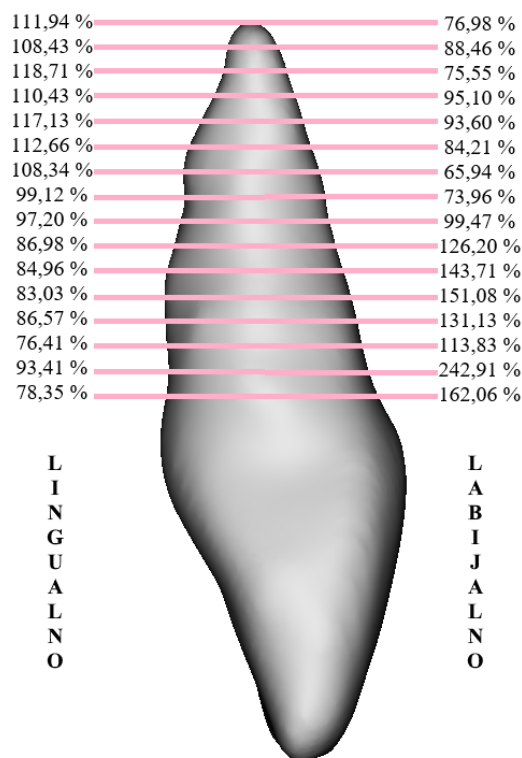


Slika 51. Zub 1 - Dijagram gustoće kosti na labijalnoj strani



Slika 52. Zub 1 - Dijagram gustoće kosti na lingualnoj strani

Iz numeričkih rezultata možemo zaključiti da kod *zuba* 1 dolazi do nagiba oko centra rotacije i to tako da se vrh krune zuba giba u ligualnom smjeru, a vrh korijena u labijalnom [Slika 53]. Gustoća u labijalnom smjeru nakon terapije veća je u odnosu na gustoću prije terapije gledano od krune do centra rotacije, a nakon centra rotacije do vrha korijena labijalna gustoća se smanjila. Upravo suprotno labijalnoj gustoći, lingualna gustoća smanjila se gledano od krune do centra rotacije, a nakon centra rotacije do vrha korijena vidi se povećanje lingualne gustoće. Iz dijagrama možemo približno očitati i centar rotacije koji bi za *zub* 1 bio između mjernih presjeka 50,6 i 52,4.

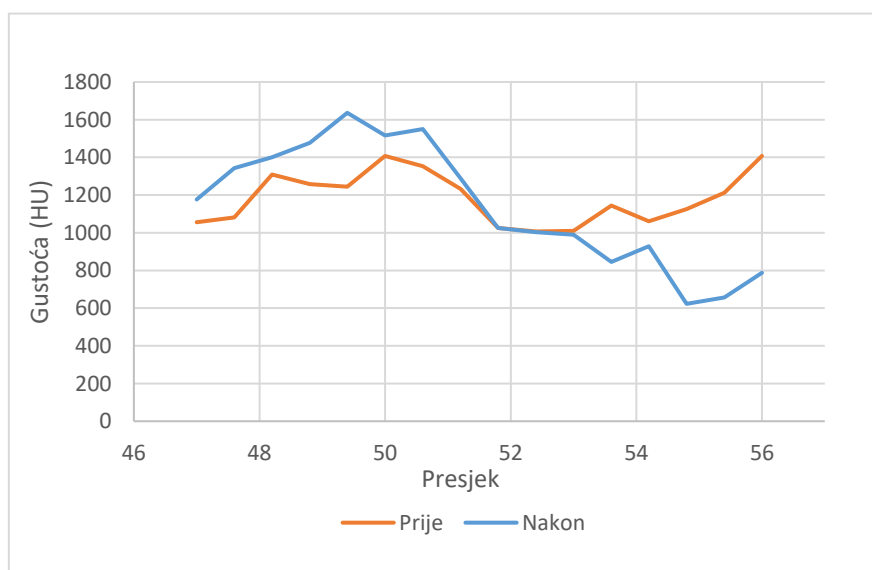


Slika 53. Zub 1 - Gustoća kosti nakon ortodontske terapije u odnosu na početnu gustoću (izraženo u postocima)

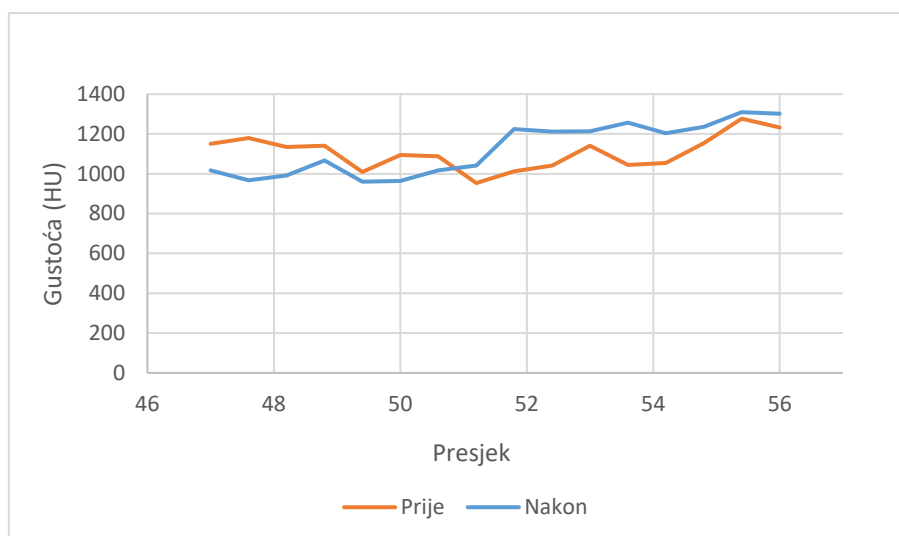
6.3.2.2. Zub 2

Tablica 7. Zub 2 - Promjena gustoće prije i nakon terapije

Mjerni Presjek	Labijalno			Lingualno		
	Prije	Nakon	$\frac{HU_{Nakon}}{HU_{Prije}} \cdot 100\%$	Prije	Nakon	$\frac{HU_{Nakon}}{HU_{Prije}} \cdot 100\%$
47	1055,65	1175,81	111,38 %	1150,97	1016,44	88,31 %
47,6	1081,22	1342,48	124,16 %	1178,75	967,75	82,10 %
48,2	1309,22	1400,03	106,94 %	1133,67	990,72	87,39 %
48,8	1257,77	1476,75	117,41 %	1140,33	1066,21	93,50 %
49,4	1244,21	1636,33	131,52 %	1008,25	960,17	95,23 %
50	1407,59	1516,78	107,76 %	1094,08	963,28	88,04 %
50,6	1352,91	1550,70	114,62 %	1088,47	1016,55	93,39 %
51,2	1232,55	1289,03	104,58 %	953,33	1040,55	109,15 %
51,8	1025,49	1024,64	99,92 %	1012,08	1224,14	120,95 %
52,4	1007,00	1003,33	99,64 %	1041,22	1211,33	116,34 %
53	1009,80	990,36	98,08 %	1140,53	1213,25	106,38 %
53,6	1143,73	846,02	73,97 %	1044,25	1257,03	120,38 %
54,2	1061,04	928,46	87,50 %	1053,75	1202,73	114,14 %
54,8	1124,89	622,98	55,38 %	1154,22	1235,59	107,05 %
55,4	1211,44	656,08	54,16 %	1276,78	1309,09	102,53 %
56	1407,77	787,02	55,91 %	1231,64	1302,19	105,73 %

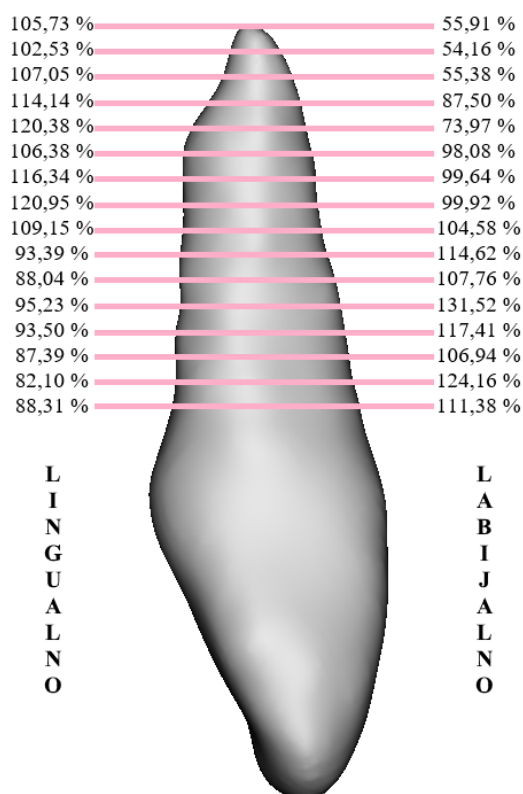


Slika 54. Zub 2 - Dijagram gustoće kosti na labijalnoj strani



Slika 55. Zub 2 - Dijagram gustoće kosti na lingualnoj strani

Iz dijagrama i numeričkih rezultata možemo pretpostaviti da se *zub 2* pomaknuo vrhom krune u lingualnom smjeru, a vrhom korijena u labijalnom [Slika 56]. Došlo je do nagiba oko centra rotacije koji se za ovaj zub nalazi između presjeka 50,6 i 51,2. Labijalna gustoća se povećala na djelu između krune i centra rotacije, a od centra rotacije do vrha korijena došlo je do njezinog smanjenja. Lingualna gustoća se smanjila u odnosu na gustoću prije terapije gledajući od krune zuba do centra rotacije, a povećala se od centra rotacije do vrha korijena.

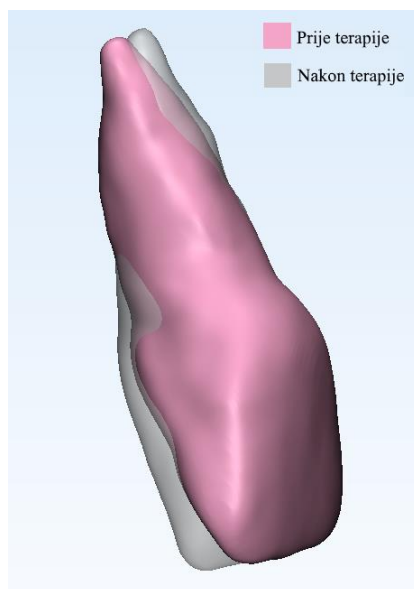


Slika 56. Zub 2 - Gustoća kosti nakon ortodonske terapije u odnosu na početnu gustoću (izraženo u postocima)

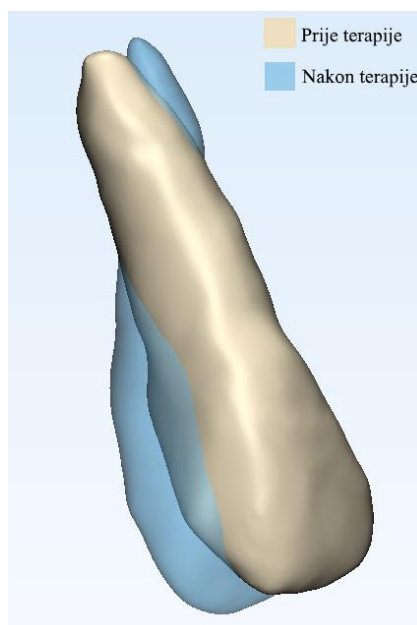
6.4. Nagib i rotacija

Pomoću očitanih gustoća pretpostavljen je smjer nagiba odnosno pomaka zuba, no iznos pomaka nije moguće na taj način točno odrediti. Modele zubi prije i nakon terapije moguće je dovesti u direktnu vezu pomoću programa 3-Matic.

Slike 57 i 58 prikazuju položaj oba zuba prije i poslije terapije u 3-Maticu. Iz slika je vidljivo da se oba zuba nagnju sukladno promjenama gustoće koje su prethodno očitane.



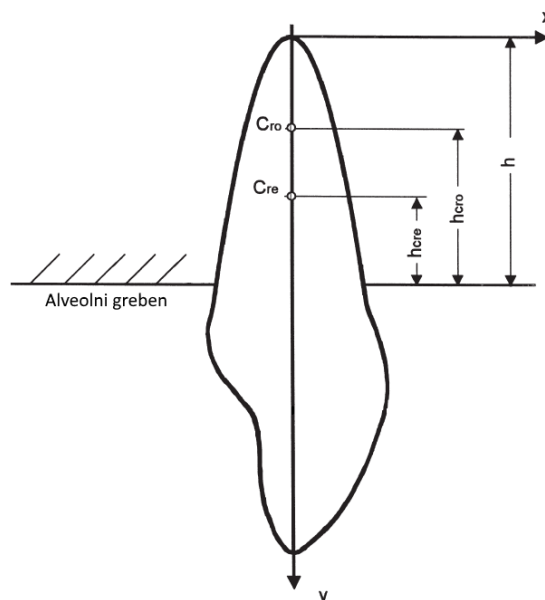
Slika 57. Zub 1 u programu 3-Matic



Slika 58. Zub 2 u programu 3-Matic

6.4.1. Centar rotacije

Iz predložene teorije da se centar otpora (Cre) i centar rotacije (Cro) mogu odrediti pomoću linearno - elastičnih pretpostavki ponašanja parodontnog ligamenta, Burstone je iznio teorijsku formulu (Burstoneovu formulu) za izračun Cro-a uz pretpostavku da se Cre nalazi na 40% visine korijena (h) [Slika 59] od alveolnog grebena [23].



Slika 59. Definiranje položaja centra rotacije (Cro) i centra otpora (Cre) [23]

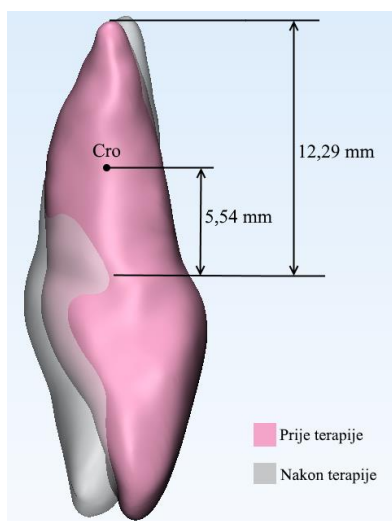
U radu "A comparative FEM-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament" [23] provedeni su eksperimenti gdje je dobiveno da se Cre nalazi na 48% dužine od alveolnog grebena, što je blizu kliničkim rezultatima Christiansena i Burstonea. U dvije druge teorijske analize, središte rotacije izračunato je s obzirom na duljinu korijena i primjenu sile ili u odnosu na primjenu sile i konus korijena. Provedena je i *in vitro* studija na ljudskim zubima ugrađenim u materijale slične gumi koji su simulirali parodontni ligament i smjestili Cre na prosječnu visinu od 34% (u rasponu od 27 do 42%) [23].

Tablica 8. Izračunati položaji Cre i Cro pomoću Burstoneove pormule i FEM analize [23]

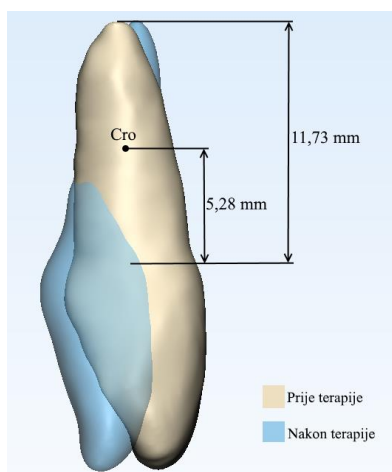
Dužina korijena (mm)	Cre (%) FEM	Burstone	Cro (%) FEM	Burstone
8	34,4	40,0	40,3	46,0
10	35,5	40,0	42,3	46,9
13	36,5	40,0	44,5	48,0
15	37,0	40,0	45,6	48,6

U Tablici 8 prikazani su izračunati položaji Cre i Cro pomoću Burstonove formule i FEM analize za nekoliko dužina korijena paraboloidnog maksilarnog središnjeg sjekutića, koristeći izotropni linearno-elastični parodontni ligament.

Položaji centara rotacije za *zub 1* i *zub 2*, očitani iz 3Matic-a, nalaze se na udaljenosti od 45% od alveolnog grebena, što se poklapa sa rezultatima iz Tablice 8. Prema očitanim gustoćama, centar rotacije za *zub 1* nalazio bi se 5% više od centara rotacije prikazanog na Slici 60, dok bi se centar rotacije za *zub 2* nalazio 2% niže od centra rotacije prikazanog na Slici 61. Uočena su manja odstupanja koja su vrlo vjerojatno uzrokovana smetnjama u CT snimkama prije i nakon terapije.



Slika 60. Centar rotacije zuba 1

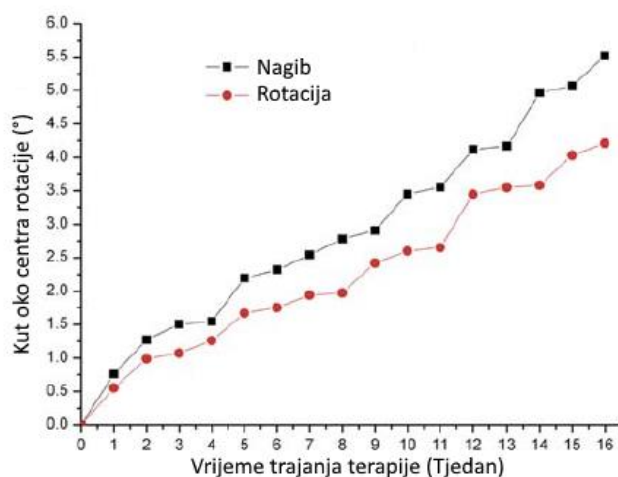


Slika 61. Centar rotacije zuba 2

6.4.2. Nagib

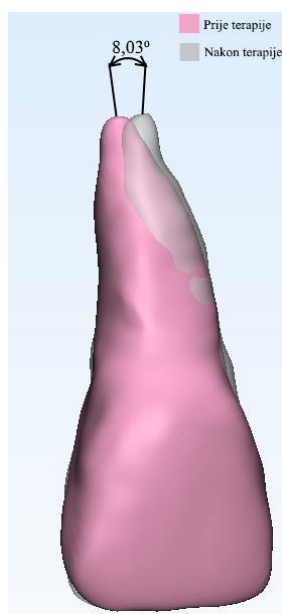
Kao što je već navedeno, kod nagiba se radi o naginjanju zuba oko centra rotacije. U ovom slučaju riječ je o nekontroliranom naginjanju gdje dolazi do pomaka i krune i vrha korijena zuba.

Na dijagramu, Slika 62, prikazan je odnos nagiba i rotacije u određenom vremenskom periodu [24]. Uočeno je da je kut nagiba u četiri mjeseca postigao vrijednost od $5,5^\circ$, što predstavlja nagib od približno $0,344^\circ$ u tjedan dana (radi jednostavnosti i usporedbe s rezultatima u ovom radu, pretpostavljeno je da je nagib zuba rastao linearno, iako je u dijagramu prikazano suprotno). Moment primijenjen u slučaju opisanom na Slici 62, bio je 10 Nmm, odnosno primijenjena sila na kraku od 10 mm bila je 1 N [24].

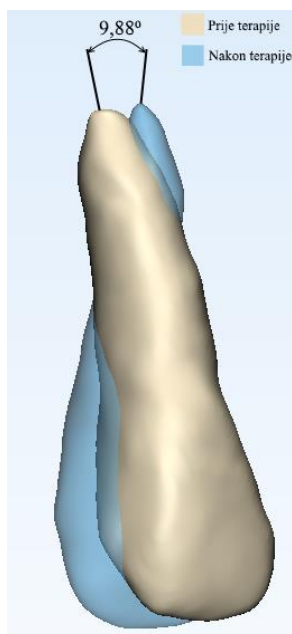


Slika 62. Dijagram promjene kuta rotacije i nagiba u periodu trajanja terapije [24]

Na Slikama 63 i 64 prikazani su kutovi nagiba oko centra rotacije za *zub 1* i *zub 2* nakon provedene 16,5 mjeseci. Pretpostavljeno je radi pojednostavljenja da je nagib u tijeku terapije imao linearni rast te je za *zub 1* u tjedan dana nagib porastao za $0,154^\circ$, a za *zub 2* porast nagiba bio je $0,19^\circ$ po tjednu [Slika 65].

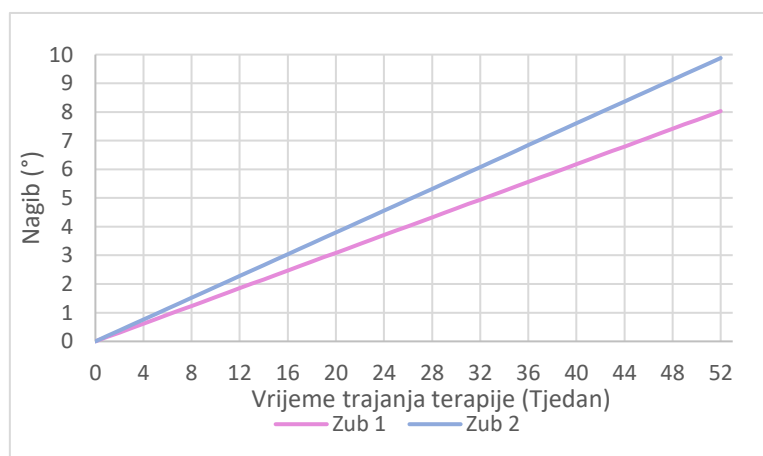


Slika 63. Nagib zuba 1



Slika 64. Nagib zuba 2

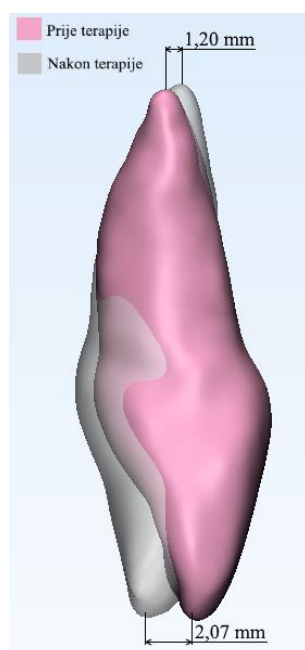
Kada bi u stvarnosti, za vrijeme trajanja cijele terapije, nagib rastao linearno, kako je prikazano na dijagramu na Slici 65, sile primijenjene u liječenju morale bi biti konstantne i vrlo malih iznosa, ispod 1 N. Budući da je poznato da ortodontsko pomicanje zuba ima tri faze, kao što je opisano u poglavlju 5.5. i prikazano na slici 40, primijenjena sila je bila u granicama preporučenih, ali nagib u tijeku terapije nije rastao linearno. Iz rezultata s dijagrama na Slici 62 vidljivo je da se nagibi, postignuti u promatranoj terapiji, mogu dobiti i u kraćem vremenskom periodu (ukupno vrijeme trajanja terapije bilo je 71 tjedan), no zbog pojave recidiva bolji odabir je duža terapija uz primjenu manjih sila. Točan tijek liječenja, te iznos ortodontskih sila nije moguće odrediti jer su dostupne CT snimke samo prije i nakon terapije, ali ne i tijekom trajanja liječenja.



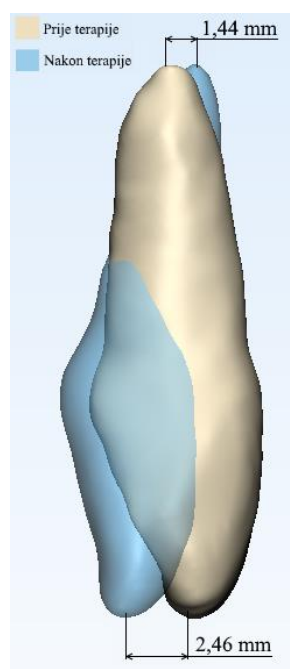
Slika 65. Dijagram linearne raspodjele nagiba za zub 1 i zub 2

6.4.2.1. Pomak korijena i krune zuba

Osim kuta nagiba moguće je očitati i pomak vrha korijena i vrha krune zuba uslijed nagiba u medijalnoj ravnini.



Slika 66. Pomaci zuba 1

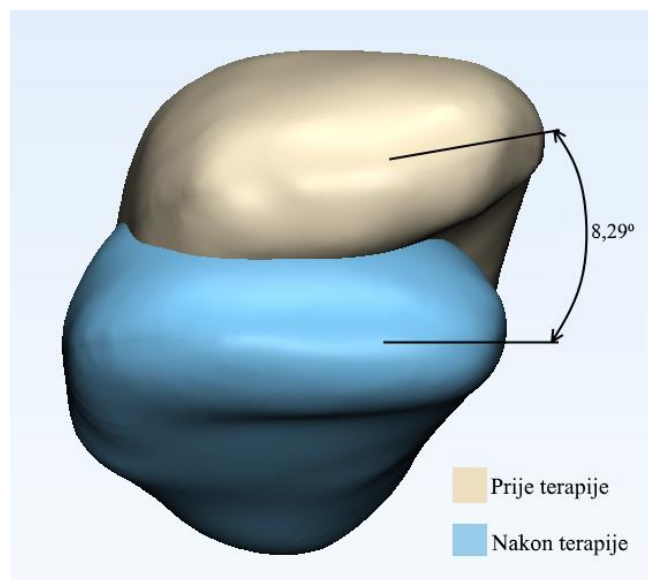


Slika 67. Pomaci zuba 2

Iz Slika 66 i 67 vidljivo je da *zub 2* ima veći pomak vrha korijena i vrha krune od *zuba 1*, što je proporcionalno odnosu njihovih kutova nagiba.

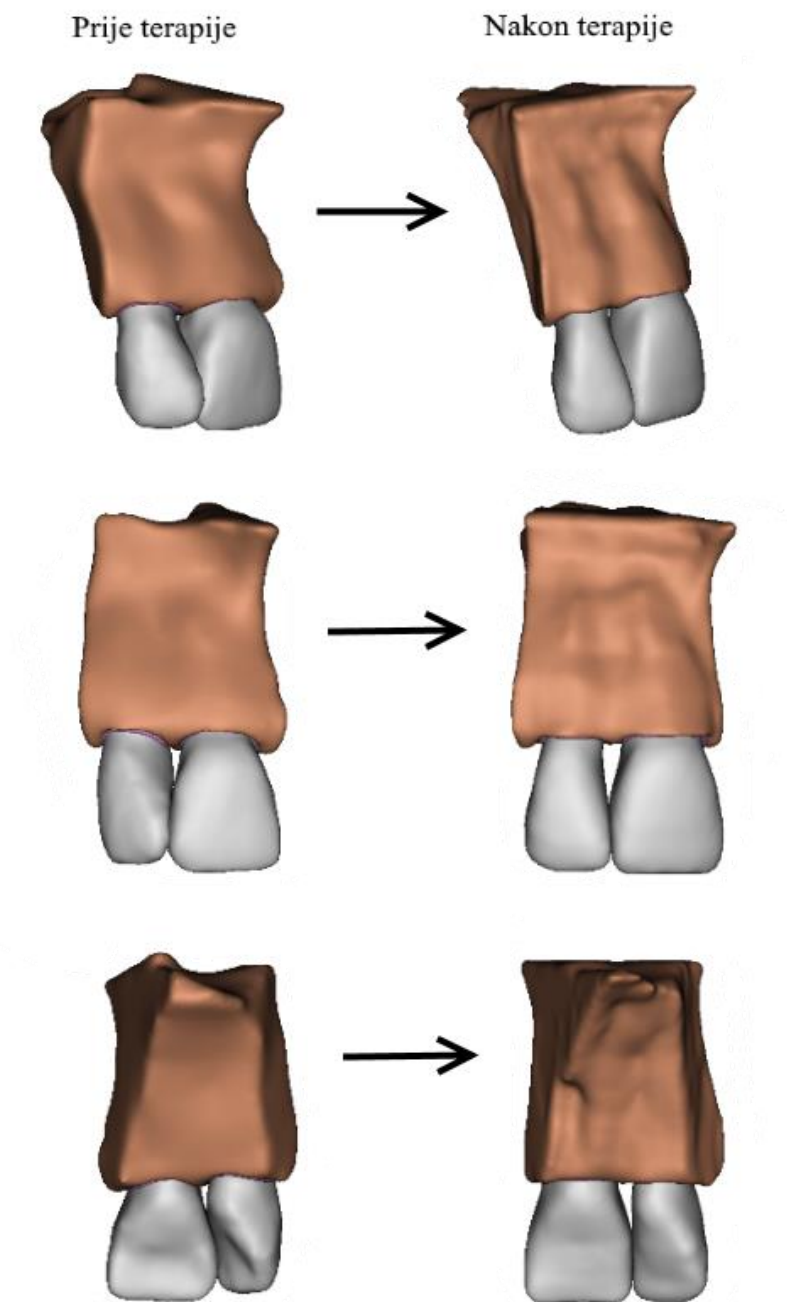
6.4.3. Rotacija zuba 2

Učitavanjem modela zuba 2 prije i nakon terapije u 3-Matic te pogledom u okuzalnoj ravni, možemo primijetiti da je došlo do rotacije. Kruna zuba 2 prije terapije bila je zakrenuta bukalno, a nakon terapije došla je u pravilnu poziciju. Pri rotaciji zub se zakrenuo za $8,29^\circ$ [Slika 68].



Slika 68. Rotacija zuba 2

Primjenom nagiba i rotacije u ortodontskoj terapiji došlo je do željenog rezultata odnosno pravilnog zagriža. Na Slici 69 prikazani su modeli zuba sa parodontnim ligamentima i pripadajućim dijelom alveolne kosti prije i nakon terapije gdje je jasno vidljiva promjena njihovog položaja.



Slika 69. Modeli prije i nakon terapije

6.5. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti kortikalne kosti možemo izraziti preko prividne gustoće kosti [25],

$$E = 3,3 \cdot (\rho_{\alpha})^{2,4}, \quad (1)$$

gdje je ρ_{α} prividna gustoća kosti izražena u $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, a E je modul elastičnosti izražen u $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$. Prividna gustoća kosti predstavlja masu kosti, bez koštane srži, podijeljenu s volumenom što ga kost

zauzima. Iz jednadžbe (1) vidimo da se vrijednost modula elastičnosti razlikuje od kosti do kosti, ali isto tako i između dijelova jedne kosti.

1977. Carter i Haynes [25] predstavili su empirijsku formulu koja povezuje modul elastičnosti proizvoljne kosti s prividnom gustoćom:

$$E = C \cdot \dot{\epsilon}^{0,06} \cdot (\rho_\alpha)^3, \quad (2)$$

gdje su: E modul elastičnosti u $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, C je materijalna konstanta, $\dot{\epsilon}$ je brzina deformacije tijekom opterećenja u $\frac{1}{\text{s}}$, a ρ_α je prividna gustoća u $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Istraživanja su potvrdila kako je utjecaj deformacije $\dot{\epsilon}$ jako mali te se može zanemariti. Stoga jednadžba (2) prelazi u oblik:

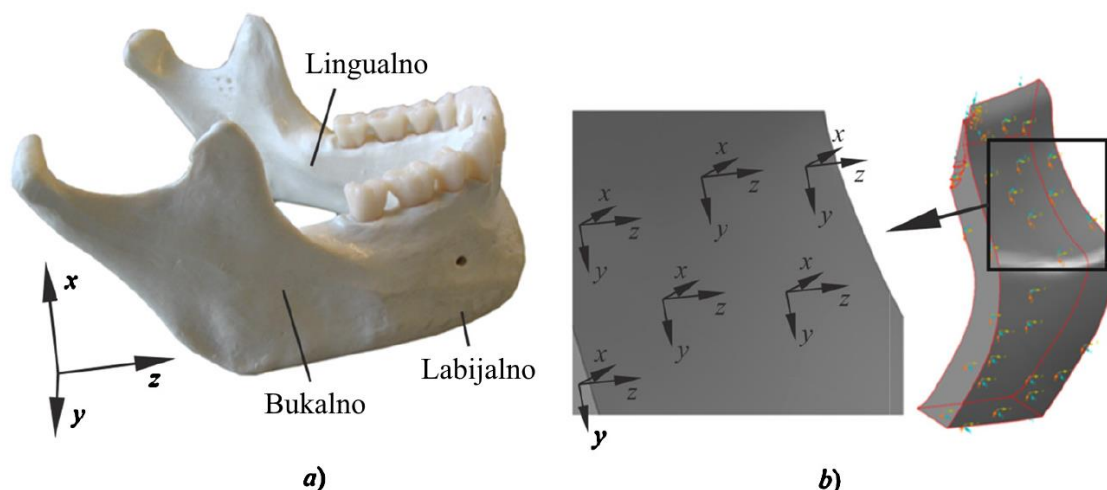
$$E = C \cdot (\rho_\alpha)^3. \quad (3)$$

Materijalna konstanta C u jednadžbi (3) određena je nizom *in vitro* testiranja. Prema radu Huanga [25], sugerirana vrijednost konstante C je 1250 za kortikalnu kost i 250 za trabekularnu kost. Ova formula ne uzima u obzir anizotropiju kosti, tako da se može koristiti samo za izračunavanje izotropnih modula elastičnosti [25].

Rho 1995. godine predstavlja 3 empirijske linearne jednadžbe (4) koje povezuju modul elastičnosti s prividnom gustoćom kortikalne kosti [25], što pruža temelje za ortotropno modeliranje:

$$\begin{aligned} E_x &= 6,382 + 0,255 \cdot (-23,93 + 24\rho_\alpha), \\ E_y &= -13,05 + 13\rho_\alpha, \\ E_z &= -23,93 + 24\rho_\alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

gdje je E izražen u $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, a prividna gustoća ρ_α u $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Svaka od jednadžbi (4) opisuje ponašanje kosti u zasebnim smjerovima koji odgovaraju lokalnom koordinatnom sustavu na slici 70.



Slika 70. Zone mandibule (a) i prikaz osi korištenih u testiranju (b) [25]

Predložena formula za izračunavanje prividne gustoće kosti ρ_α , prema [25] je:

$$\rho_\alpha = \frac{2000}{2050} HU \quad (5)$$

Jednadžba (5) je univerzalna jednadžba te se može koristiti za izračunavanje prividne gustoće svih kostiju.

Uvrštavanjem jednadžbe (5) u jednadžbu (3) te uzimanjem vrijednosti materijalne konstante C od 1250 za korikalnu kosti [25], dobivamo jednadžbu za izračunavanje modula elastičnosti kod izotropnog modela:

$$E = 1250 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{2000}{2050} HU \right)^3 \quad (6)$$

gdje je modul elastičnosti E izražen u $\frac{N}{mm^2}$.

Ako jednadžbu (5) uvrstimo u jednadžbe (4), dobivamo 3 linearne jednadžbe za izračunavanje modula elastičnosti kod ortotropnog modela kortikalne kosti:

$$\begin{aligned} E_x &= 6,382 + 0,255 \cdot \left(-23,93 + \frac{960}{41} HU \right), \\ E_y &= \left(\frac{520}{41} HU - 13,05 \right), \\ E_z &= \left(\frac{960}{41} HU - 23,93 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Moduli elastičnosti kosti E_x , E_y i E_z ovisno o presjeku te labijalnom ili lingualnom smjeru prikazani su za pojedini zub prije i nakon terapije u Tablicama 9, 10, 11 i 12. Također je prikazana i njihova promjena.

Tablica 9. Zub 1 - Moduli elastičnosti labijalno

Mjerni presjek	Prije terapije $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$			Nakon terapije $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$			$\frac{E_{i(Nakon)}}{E_{i(Prije)}} \cdot 100\%$		
	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z
47	3264,12	6919,95	12775,45	5289,81	11222,88	20719,33	162,06%	162,18%	162,18%
47,6	2520,53	5340,41	9859,39	6122,13	12990,88	23983,33	242,89%	243,26%	243,25%
48,2	4801,11	10184,78	18802,84	5465,05	11595,13	21406,55	113,83%	113,85%	113,85%
48,8	4554,46	9660,85	17835,58	5972,27	12672,54	23395,62	131,13%	131,17%	131,17%
49,4	4532,60	9614,43	17749,88	6847,63	14531,98	26828,44	151,08%	151,15%	151,15%
50	4369,00	9266,92	17108,32	6278,50	13323,05	24596,56	143,71%	143,77%	143,77%
50,6	4835,14	10257,08	18936,30	6101,83	12947,76	23903,72	126,20%	126,23%	126,23%
51,2	5078,21	10773,40	19889,51	5051,22	10716,07	19783,68	99,47%	99,47%	99,47%
51,8	4277,17	9071,86	16748,21	3163,45	6706,11	12380,67	73,96%	73,92%	73,92%
52,4	5013,60	10636,17	19636,17	3305,86	7008,60	12939,11	65,94%	65,89%	65,89%
53	5645,61	11978,66	22114,61	4754,00	10084,72	18618,10	84,21%	84,19%	84,19%
53,6	4797,88	10177,94	18790,20	4490,75	9525,53	17585,75	93,60%	93,59%	93,59%
54,2	4860,63	10311,23	19036,28	4622,52	9805,44	18102,51	95,10%	95,09%	95,09%
54,8	5038,03	10688,04	19731,93	3806,08	8071,17	14900,79	75,55%	75,52%	75,52%
55,4	4545,68	9642,21	17801,16	4020,97	8527,63	15743,48	88,46%	88,44%	88,44%
56	4459,10	9458,31	17461,65	3432,61	7277,86	13436,21	76,98%	76,95%	76,95%

Tablica 10. Zub 1 - Moduli elastičnosti lingualno

Mjerni presjek	Prije terapije			Nakon terapije			$\frac{E_{i(Nakon)}}{E_{i(Prije)}} \cdot 100\%$		
	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z
47	7079,36	15024,21	27737,16	5546,67	11768,50	21726,63	78,35%	78,33%	78,33%
47,6	6847,69	14532,11	26828,67	6396,72	13574,17	25060,17	93,41%	93,41%	93,41%
48,2	7577,68	16082,73	29691,35	5790,52	12286,47	22682,88	76,42%	76,40%	76,40%
48,8	7074,94	15014,82	27719,84	6124,64	12996,21	23993,16	86,57%	86,56%	86,56%
49,4	7020,01	14898,14	27504,42	5828,97	12368,15	22833,67	83,03%	83,02%	83,02%
50	7721,09	16387,37	30253,77	6559,96	13920,92	25700,32	84,96%	84,95%	84,95%
50,6	6757,30	14340,09	26474,18	5877,51	12471,26	23024,03	86,98%	86,97%	86,97%
51,2	6692,04	14201,47	26218,26	6504,38	13802,84	25482,33	97,20%	97,19%	97,19%
51,8	7348,82	15596,59	28793,87	7283,92	15458,73	28539,35	99,12%	99,12%	99,12%
52,4	7217,52	15317,69	28278,98	7819,37	16596,13	30639,17	108,34%	108,35%	108,35%
53	7423,63	15755,51	29087,25	8363,60	17752,18	32773,42	112,66%	112,67%	112,67%
53,6	7272,81	15435,14	28495,80	8518,72	18081,68	33381,73	117,13%	117,15%	117,15%
54,2	7701,09	16344,88	30175,33	8504,27	18050,99	33325,07	110,43%	110,44%	110,44%
54,8	7234,78	15354,35	28346,65	8588,58	18230,07	33655,68	118,71%	118,73%	118,73%
55,4	7602,10	16134,60	29787,11	8243,05	17496,11	32300,67	108,43%	108,44%	108,44%
56	7136,86	15146,35	27962,65	7988,94	16956,33	31304,15	111,94%	111,95%	111,95%

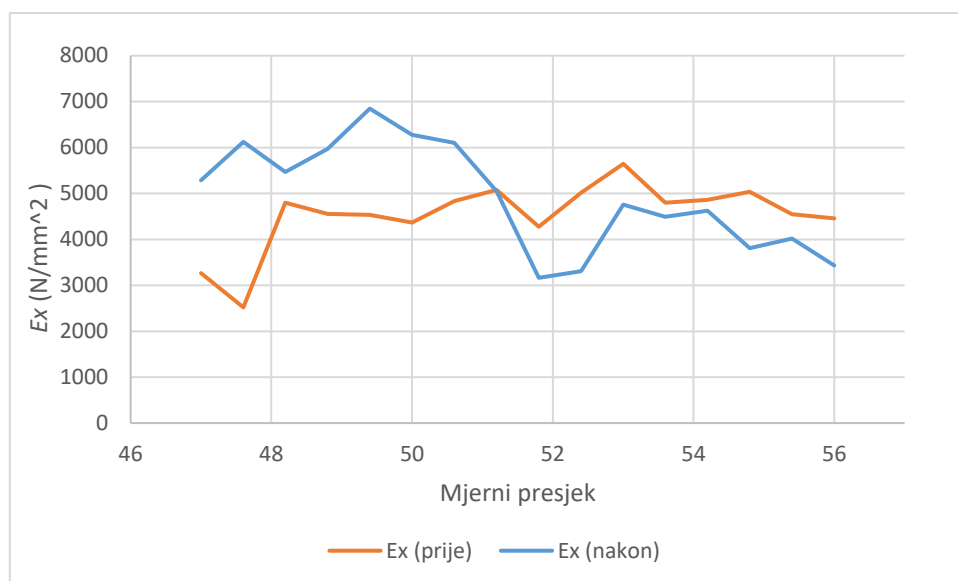
Tablica 11. Zub 2 - Moduli elastičnosti labijalno

Mjerni presjek	Prije terapije $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$			Nakon terapije $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$			$\frac{E_{i(Nakon)}}{E_{i(Prije)}} \cdot 100\%$		
	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z
47	6303,28	13375,68	24693,73	7020,73	14899,66	27507,23	111,38%	111,39%	111,39%
47,6	6455,95	13699,98	25292,44	8015,87	17013,53	31409,75	124,16%	124,19%	124,19%
48,2	7817,28	16591,69	30630,98	8359,48	17743,43	32757,26	106,94%	106,94%	106,94%
48,8	7510,09	15939,15	29426,29	8817,56	18716,46	34553,63	117,41%	117,42%	117,42%
49,4	7429,12	15767,17	29108,79	9770,37	20740,40	38290,14	131,51%	131,54%	131,54%
50	8404,62	17839,31	32934,27	9056,57	19224,16	35490,92	107,76%	107,76%	107,76%
50,6	8078,14	17145,81	31653,96	9259,09	19654,36	36285,14	114,62%	114,63%	114,63%
51,2	7359,51	15619,29	28835,78	7696,73	16335,62	30158,24	104,58%	104,59%	104,59%
51,8	6123,21	12993,16	23987,54	6118,13	12982,38	23967,64	99,92%	99,92%	99,92%
52,4	6012,81	12758,66	23554,61	5990,89	12712,11	23468,67	99,64%	99,64%	99,64%
53	6029,52	12794,17	23620,17	5913,45	12547,61	23164,99	98,07%	98,07%	98,07%
53,6	6829,18	14492,79	26756,09	5051,64	10716,96	19785,32	73,97%	73,95%	73,95%
54,2	6335,47	13444,04	24819,93	5543,87	11762,54	21715,62	87,51%	87,49%	87,49%
54,8	6716,70	14253,85	26314,96	3719,93	7888,16	14562,92	55,38%	55,34%	55,34%
55,4	7233,46	15351,55	28341,49	3917,56	8307,96	15337,94	54,16%	54,12%	54,12%
56	8405,70	17841,59	32938,49	4699,37	9968,67	18403,86	55,91%	55,87%	55,87%

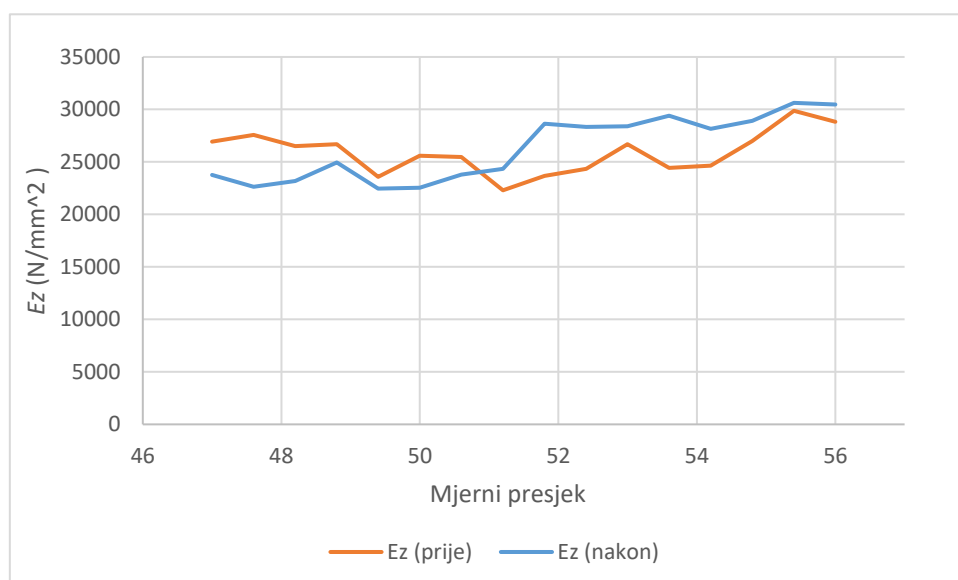
Tablica 12. Zub 2 - Moduli elastičnosti lingualno

Mjerni presjek	Prije terapije			Nakon terapije			$\frac{E_{i(Nakon)}}{E_{i(Prije)}} \cdot 100\%$		
	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z	E_x	E_y	E_z
47	6303,28	13375,68	24693,73	7020,73	14899,66	27507,23	111,38%	111,39%	111,39%
47,6	6455,95	13699,98	25292,44	8015,87	17013,53	31409,75	124,16%	124,19%	124,19%
48,2	7817,28	16591,69	30630,98	8359,48	17743,43	32757,26	106,94%	106,94%	106,94%
48,8	7510,09	15939,15	29426,29	8817,56	18716,46	34553,63	117,41%	117,42%	117,42%
49,4	7429,12	15767,17	29108,79	9770,37	20740,40	38290,14	131,51%	131,54%	131,54%
50	8404,62	17839,31	32934,27	9056,57	19224,16	35490,92	107,76%	107,76%	107,76%
50,6	8078,14	17145,81	31653,96	9259,09	19654,36	36285,14	114,62%	114,63%	114,63%
51,2	7359,51	15619,29	28835,78	7696,73	16335,62	30158,24	104,58%	104,59%	104,59%
51,8	6123,21	12993,16	23987,54	6118,13	12982,38	23967,64	99,92%	99,92%	99,92%
52,4	6012,81	12758,66	23554,61	5990,89	12712,11	23468,67	99,64%	99,64%	99,64%
53	6029,52	12794,17	23620,17	5913,45	12547,61	23164,99	98,07%	98,07%	98,07%
53,6	6829,18	14492,79	26756,09	5051,64	10716,96	19785,32	73,97%	73,95%	73,95%
54,2	6335,47	13444,04	24819,93	5543,87	11762,54	21715,62	87,51%	87,49%	87,49%
54,8	6716,70	14253,85	26314,96	3719,93	7888,16	14562,92	55,38%	55,34%	55,34%
55,4	7233,46	15351,55	28341,49	3917,56	8307,96	15337,94	54,16%	54,12%	54,12%
56	8405,70	17841,59	32938,49	4699,37	9968,67	18403,86	55,91%	55,87%	55,87%

Kako je modul elastičnosti ovisan isključivo o gustoći, njegova promjena proporcionalna je promjeni same gustoće prikazane u dijagramima na Slikama 51, 52, 54 i 55. Također je iz Tablice 9, 10, 11 i 12 vidljivo da su promjene modula elastičnosti po presjeku jednake u svim smjerovima (x, y, z). Na Slikama 71 i 72 prikazana je promjena modula elastičnosti kosti u smjeru osi x oko zuba 1 labijalno i promjena modula elastičnosti kosti u smjeru osi z oko zuba 2 lingualno.



Slika 71. Modul elastičnosti kosti E_x oko zuba 1 labijalno



Slika 72. Modul elastičnosti kosti E_z oko zuba 2 lingualno

7. ZAKLJUČAK

Učitavanjem CT snimki u Mimics i izradom modela zubi, parodontnih ligamenata i alveolne kosti može se vrlo vjerodostojno do najmanjih detalja prikazati tkivo pacijenta kod ortodontske terapije. Analizom očitanih gustoća alveolne kosti uz zub prije i nakon terapije utvrđen je smjer gibanja te položaj centra rotacije za svaki zub. Osim toga, jasno je vidljiv rezultat koštane pregradnje. Gustoća kosti se smanjila u području opterećenom tlačno, dok se na mjestima opterećenima vlačno gustoća povećala. Kod oba zuba došlo je do razgradnje kosti u labijalnom području gledajući od centra rotacije do vrha korijena, te u lingualnom području od krune zuba do centra rotacije. Do pregradnje, odnosno povećanja gustoće alveolne kosti, došlo je u labijalnom području od krune zuba do centra rotacije i u lingualnom području od centra rotacije do vrha korijena za oba zuba.

Program 3-Matic omogućio je provjeru i u konačnici potvrdu pretpostavki donesenih na temelju očitanih gustoća. U njemu je bilo moguće modele zuba prije i poslije ortodontske terapije dovesti u direktnu vezu te vizualno prikazati promjenu položaja. Osim same vizualizacije moguće je bilo izmjeriti nagib odnosno pomak i rotacije pojedinog zuba, te odrediti položaj centra rotacije za nagib. Do malih odstupanja u položaju centra rotacije očitnog u 3-Maticu te onog dobivenog očitavanjem gustoća moglo je doći uslijed odstupanja pojedinih HU vrijednosti. Ta odstupanja se ponajviše očitavaju u labijalnom području u kojem je kortikalna kost vrlo tanka, te pri mjerenju dolazi do zahvaćanja okolnog područja na kojem nema kosti. Iz dijagrama promijene gustoće [Slike 51, 52, 54 i 55], vidljivo je da gustoće u labijalnom području imaju veća odstupanja od gustoća u lingualnom području. Pri izračunu modula elastičnosti i njegove promjene prije i nakon terapije, primijetili smo jednak odnos kao i kod promjena gustoće, odnosno, promjena modula elastičnosti proporcionalna je promjeni gustoće. Konačan rezultat terapije vidljiv je na slici 69.

LITERATURA

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=67493> (12.1.2019.)
- [2] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Vježba 1, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [3] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zub> (12.1.2019.)
- [4] <http://people.umass.edu/ajsmi1/rdentition.html> (12.1.2019.)
- [5] Jasna Leder Horina; Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008.
- [6] Nakaš E, Tiro A; Džemidžić V; Redžepagić-Vražalica L; Ajanović M; Osnovi ortodontske dijagnostike, (2014.), Univerzitet u Sarajevu, Stomatološki fakultet sa klinikama
- [7] <https://drmartinko.com/hr/tipovi-zuba-u-ustima/> (29.1.2019.)
- [8] <http://www.poliklinika-kustec.hr/svaki-zub-ima-svoje-ime/> (29.1.2019.)
- [9] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Vježba 2, ppt prezentacija, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [10] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Histološka građa cakline, ppt prezentacija, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [11] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Histološka građa dentina, ppt prezentacija, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [12] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Histološka građa pulpe, ppt prezentacija, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [13] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Građa i funkcija cementa, ppt prezentacija, parodontnog ligamenta i alveolne kosti, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Bone_modeling (6.2.2019)
- [15] Morfologija zubi s dentalnom antropologijom - Vježba 4, ppt prezentacija, Stomatološki fakultet, Zagreb, 2012.
- [16] Bilješke sa predavanja iz kolegija Biomaterijala, prof. Sušić, 2017./2018.
- [17] Špalj S. i suautori; Ortodontski priručnik, 2012, Medicinski fakultet sveučilišta u Rijeci
- [18] Ram S. Nanda; Yahya S. Tpusn; Biomechanics in Orthodontics: Principles and Practice, 2010., Quintessence Publishing Co. Inc
- [19] <http://www.dentalpedia.ca> (12.2.2019.)
- [20] Arturo N Nataili; Dental Biomechanics, 2003., Taylor & Francis

- [21] Jasna Leder Horina; Modeliranje iniciranja koštane pregradnje kod ortodontske terapije, Doktorski rad, Zagreb, 2015.
- [22] <https://www.materialise.com/en/medical/software/mimics> (15.2.2019.)
- [23] Christopher G. Provatidis; A comparative FEM-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament, National Technical University of Athens, 2000., Athens
- [24] Chao Wang; Jingyun Han; Qing Li; Lizhen Wang; Yubo Fan; Simulation of bone remodelling in orthodontic treatment, Beihang University, 2012., China
- [25] Gačnik F., Ren Z., Ihan Hren N. (2014.) Modified bone density-dependent orthotropic material model of human mandibular bone. *Medical Engineering & Physics* (36), str 1684-1692